



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**DESEMPENHO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL NO ESTADO
FRESCO E ENDURECIDO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA COM
USO DE SÍLICA DA CASCA DE ARROZ**

Camila Haefliger

Lajeado, novembro de 2017.

Camila Haefliger

**DESEMPENHO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL NO ESTADO
FRESCO E ENDURECIDO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA COM
USO DE SÍLICA DA CASCA DE ARROZ**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: M.^a Débora Pedroso Righi

Lajeado, novembro de 2017.

Camila Haefliger

**DESEMPENHO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL NO ESTADO
FRESCO E ENDURECIDO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA COM
USO DE SÍLICA DA CASCA DE ARROZ**

Prof. Ma. Débora Pedroso Righi – orientadora
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Me. Rafael Mascolo
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Ma. Fernanda Bianchi Pereira da Costa
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Lajeado, novembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Acredito que a vida é dividida em etapas, e para alcançarmos a próxima precisamos concluir a anterior. O fechamento desta etapa de graduação chama-se Trabalho de Conclusão de Curso, não é mais e nem menos importante do que todos os seis anos de estudo da graduação, porém é um encerramento, um trabalho que nos garante a despedida do título de estudantes para baracheis de Engenharia Civil.

Nesta jornada não foram poucas as pessoas que me auxiliaram para hoje chegar neste limite de fases, para começar agradeço aos professores da instituição que nunca me negaram respostas e seu tempo de ensinamento. Em especial, a minha orientadora Prof. Ma. Débora Pedroso Righi, que sempre me apoiou e ajudou nos momentos fáceis e difíceis, com palavras de afeto e gratidão.

Agradeço à minha família, pai, mãe e irmã por sempre me apoiarem em todas as minhas decisões e se preocuparem com meu bem-estar e satisfação pessoal. Em especial ao meu namorado Andrei Gugel que pôde me auxiliar durante toda a graduação, mas em particular neste momento final, durante as atividades práticas que este estudo me proporcionou.

Aos meus amigos de graduação que também me auxiliaram nas atividades práticas e ao pessoal do LATEC (Laboratório de Tecnologias de Construção) que sempre estavam dispostos a ajudar. Agradeço aos amigos que entenderam momentos de ausência e sempre que possível me levantavam com palavras de apoio, em especial à Débora Fin que por várias vezes fez esse papel.

“Ama-se mais o que se conquista com esforço”.
Benjamin Disraeli

RESUMO

Concreto autoadensável (CAA) é um tipo específico de concreto que extingue a necessidade de vibração durante a concretagem. Este tipo de concreto só pode ser considerado autoadensável se atingir três parâmetros básicos simultaneamente: fluidez, coesão e resistência à segregação. Apesar de o concreto ser um assunto bastante estudado no ramo tecnológico do país, há carência de estudos relacionados ao concreto autoadensável quando estas pesquisas estão associadas às adições minerais. Por isso é importante que os aspectos do CAA no estado fresco e endurecido sejam estudados com uso da sílica de casca de arroz, com o intuito de reduzir o consumo de cimento que este tipo de concreto possui quando comparado ao concreto convencional. O programa experimental do estudo consiste na adaptação de um traço já estudado na bibliografia e na realização de ensaios no estado fresco e endurecido. O principal objetivo do trabalho é avaliar a influência que a substituição parcial de cimento por CCA sobre as propriedades do concreto autoadensável. Para atingir o objetivo principal foram estudados quatro traços diferentes, um de referência, sem substituição de CCA, os outros três com substituição em volume de cimento de 5%, 10% e 15% de cinza de casca de arroz. Com a substituição, e consequente diminuição do consumo de cimento, os quatro traços de CAA não perderam suas propriedades autoadensáveis. No estado fresco houve melhora da fluidez quando a substituição foi de 5% a 10% de CCA, porém quando esta foi de 15% houve perda de fluidez, ou seja, aumento da coesão, mas ao mesmo tempo, os resultados puderam se equiparar aos do traço de referência. Não houve segregação em nenhum dos ensaios realizados durante o estudo. No estado endurecido percebeu-se melhora do ganho de resistência conforme os traços atingiram idades superiores. Ou seja, os traços com adição tiveram maior ganho de resistência percentual nas idades de 28 e 63 dias de rompimento, em comparação ao traço de referência.

Palavras-chave: concreto autoadensável; substituição; cinza de casca de arroz.

ABSTRACT

Self-compacting concrete is a specific type of concrete that extinguishes the need of vibration during the concreting. This kind of concrete can be considered self-compacting if it gets three basics parameters at the same time: fluidity, cohesion and resistance to segregation. Despite the fact that the concrete is a subject quite studied in the technological cluster on the country, there is a lack in studies about self-compacting concrete when these studies are associated with mineral additions. For this reason the aspects of the self-compacting concrete within the use of rice husk ash are important to be studied, in order to reduce the consumption of cement that this kind of concrete needs when compared to the conventional concrete. The experimental program of this study consists in the suiting of one dash already studied and in the execution of tests in the fresh state and hardened state of the concrete. The main objective of this study is to measure the influence that the partial replacement of cement to rice husk ash has about the properties of the self-compacting concrete. To reach the main objective four different dashes were studied: one as reference (without substitution) and the other three with volume substitution of cement in 5%, 10% and 15% of rice husk ash. With the replacement and decrease of the cement consumption, the four dashes of self-compacting concrete did not lose their self-compacting proprieties. In the fresh state there was improvement in fluidity when the substitution was from 5 to 10% of rice husk ash. However when the substitution was from 15% there was decrease in fluidity, in other words, improvement of cohesion. Either way, all results could be equated with the results of the reference dash. There was no segregation in the concrete mate during the tests. In the hardened state was observed improvement of strength in concordance with the age of the dashes. More precisely, the dashes with rice husk ash got better percent strength gain in the ages of 28 and 63 days, comparing to the reference dash.

Key-words: self-compacting concrete; replacement; rice husk ash.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ponte Akashi-Kaikyo, fundada em 1998.	21
Figura 2 – Laje do metrô de São Paulo com concreto autoadensável	21
Figura 3 – Classificação dos agregados	25
Figura 4 – Faixas granulométricas zonas 1 a 4.....	27
Figura 5 – Curvas granulométricas na norma e pedreiras	29
Figura 6 – Fluxograma metodologia do programa experimental	31
Figura 7 – Cimento Portland CP V-ARI Itambé	33
Figura 8 – Ensaio da massa específica da cinza de casca de arroz	35
Figura 9 – Cinza da casca de arroz Pilleco Nobre	35
Figura 10 – Fíller calcário UniCal-B.....	36
Figura 11 – Ensaio da massa específica para as areias	37
Figura 12 – Ensaio da massa unitária para as areias	38
Figura 13 – Ensaio de granulometria das areias	39
Figura 14 – Ensaio da massa específica para as britas	41
Figura 15 – Ensaio de massa unitária das britas.....	41
Figura 16 – Esquema da metodologia utilizada.....	45
Figura 17 – Perspectiva e execução do ensaio.....	45
Figura 18 – Esquema do ensaio J-ring test.....	46
Figura 19 – Vista superior, frontal e lateral do funil	47
Figura 20 – Caixa em L em perspectiva.....	47
Figura 21 – Prensa hidráulica.....	49
Figura 22 – Resultado do Slump Flow Test para cada traço.....	51

Figura 23 – Resultados J-ring test.....	53
Figura 24 – Realização do L-box test.....	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Granulometria da areia média	39
Gráfico 2 – Granulometria da areia fina	40
Gráfico 3 – Curva granulométrica brita 0.....	42
Gráfico 4 – Curva granulométrica brita 1	42
Gráfico 5 – Resultados da resistência à compressão axial	56
Gráfico 6 – Resultados da resistência à tração diametral	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaio e suas propriedades	17
Tabela 2 – Classes de espalhamento (Slump Flow Test)	17
Tabela 3 – Classes de viscosidade plástica aparente (Slump Flow T ₅₀ Test)	18
Tabela 4 – Classes de habilidade passante pelo anel J (J-ring Test)	18
Tabela 5 – Classes de habilidade passante pela caixa L (L-box Test).....	18
Tabela 6 – Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (V-funnel Test)....	18
Tabela 7 – Relação das vantagens do CAA.....	19
Tabela 8 – Classes de cimento Portland	23
Tabela 9 – Porcentagens retidas em cada faixa granulométrica de areia	27
Tabela 10 – Limites do módulo de finura para cada faixa granulométrica	28
Tabela 11 – Exigências mecânicas	32
Tabela 12 – Composição química da cinza de casca de arroz	34
Tabela 13 – Composição física da cinza de casca de arroz	34
Tabela 14 – Características do fabricante do aditivo MC-PowerFlow 3100	43
Tabela 15 – Traços do programa experimental	44
Tabela 16 – Classes de espalhamento e valores obtidos no Slump Flow Test.....	51
Tabela 17 – Classes de viscosidade e valores obtidos no Slump Flow T ₅₀ Test	52
Tabela 18 – Classes de habilidade passante e valor obtidos para o J-ring Test.....	54
Tabela 19 – Classes de viscosidade plástica e valores obtidos para o V-funnel Test	54
Tabela 20 – Classes de habilidade passante e valor obtidos para o L-box Test.....	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Considerações Iniciais	11
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
1.3 Justificativa.....	14
1.4 Delimitações do Trabalho	14
1.5 Estrutura do Trabalho	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Definições	16
2.2 Vantagens do CAA em comparação ao Concreto Convencional Vibrado ...	19
2.3 Exemplos de obras com utilização de CAA	20
2.4 Materiais utilizados	22
2.4.1 Cimento.....	22
2.4.2 Filler calcário	24
2.4.3 Adições Minerais CCA	24
2.4.4 Agregados.....	25
2.4.5 Aditivo superplastificante.....	29
2.4.6 Água	30
2.5 Influência da CCA no CAA.....	30
3 METODOLOGIA	31
3.1 Materiais constituintes.....	32
3.1.1 Cimento	32
3.1.2 Adições minerais CCA	33

3.1.3 Filler calcário	36
3.1.4 Agregado miúdo	36
3.1.5 Agregado graúdo	40
3.1.6 Aditivo Superplastificante	43
3.1.7 Água	43
3.2 Dosagem utilizada	43
3.3 Ensaio no estado fresco	45
3.3.1 Slump Flow Test	45
3.3.2 Slump Flow T50 test	46
3.3.3 J-ring test.....	46
3.3.4 V-funnel test	47
3.3.5 L-box test.....	47
3.4 Ensaio no estado endurecido	48
3.4.1 Teste de compressão axial	48
3.4.2 Teste de tração diametral.....	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1 Estado fresco.....	50
4.1.1 Slump Flow Test.....	50
4.1.2 Slump Flow T50 Test.....	52
4.1.3 J-ring Test	53
4.1.4 V-funnel Test.....	54
4.1.5 L-box Test	54
4.2 Estado endurecido	56
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
BIBLIOGRAFIA	60
APÊNDICES	64
APÊNDICE A – Tabelas de resultados do peneiramento da areia média e fina.....	65
APÊNDICE B – Tabelas de resultados do peneiramento das britas 0 e 1	67
APÊNDICE C – Quadro de resultados de rompimento de CP para compressão axial	68
APÊNDICE D – Quadro de resultados de rompimento de CP para tração diametral	69

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O concreto é a forma mais tradicional de aplicação dos materiais existentes na construção civil, mesmo com a inovação tecnológica cada vez mais crescente no ramo da construção, nenhum material supera a utilização do concreto. Mehta e Monteiro (2014) relatam que o consumo de concreto em 1993 foi estimado em 3 bilhões de toneladas, o equivalente a uma tonelada por ser humano. Pedroso (2009) afirma que são consumidos 11 bilhões de toneladas anualmente no mundo, já no Brasil são utilizados 30 milhões de m³ diretamente de centrais dosadoras. Estima-se que atualmente o consumo de concreto no mundo esteja na ordem de 13 bilhões de toneladas por ano, nenhum outro material é utilizado nessa escala, com a exceção da água.

Com a necessidade de otimização no canteiro de obras, redução do tempo de execução, minimização da poluição, diminuição do ruído causado por vibradores e redução da mão de obra, pesquisadores têm estudado formas de aperfeiçoamento do concreto. Mediante dessa necessidade surge o concreto autoadensável (CAA), um concreto com capacidade de autoadensabilidade, sem necessidade de vibração, resultando na minimização da quantidade de mão de obra necessária e melhoria do aspecto final quando comparado ao concreto convencional vibrado (CCV).

Conforme Tutikian e Dal Molin (2008) o CAA surgiu no Japão no fim da década de 80, da necessidade do país de um concreto mais durável e que necessitasse menor consumo de mão de obra, já que o país vinha sofrendo escassez desta no mercado

da construção civil. Mesmo o concreto autoadensável sendo um produto mais caro do que o convencional, a redução em mão de obra e o acréscimo da qualidade resultam em ganho econômico com sua utilização.

O potencial e versatilidade do CAA é visível no mercado construtivo, dessa forma pesquisas são fundamentais nesse ramo, aprofundando a tecnologia e os parâmetros base para a confecção deste tipo de concreto no país, uma vez que atualmente o custo do CAA não pode mais ser considerado uma justificativa para a não utilização deste em obra. É comprovado por diversos estudos que suas vantagens são também um atrativo econômico e que se equalizam, ou ainda são minimizadas, ao custo do concreto convencional quando equiparadas ao custo por m³ de concreto autoadensável.

Tutikian e Dal Molin (2008) explicam que o custo do CAA é 10% superior ao CCV, mas indústrias de pré-moldados conseguem redução de 2 a 8% neste valor, ao mesmo tempo que este acréscimo é contornado com a diminuição da quantidade de mão de obra necessária, ou seja, o número de operários. Contudo acredita-se que a grande resistência para a não utilização deste material é o desconhecimento de sua tecnologia, fator que está sendo modificado com pesquisas como esta.

Ao mesmo tempo, Mehta e Monteiro (2014), acreditam que as adições minerais quando incorporadas ao concreto resultam em efeitos benéficos para a composição, tais como economia de energia e custo. Um exemplo de adição mineral é a sílica da cinza de casca de arroz, um subproduto da calcinação da casca de arroz. Este material vem ganhando espaço no mercado pelas inúmeras pesquisas realizadas utilizando-a como adição na substituição parcial do cimento, tanto em argamassas quanto em concretos.

O interesse pela substituição se dá pelo aproveitamento da cinza da casca de arroz, sendo este um subproduto agroindustrial. Dessa forma há o ganho ambiental, em aproveitamento, e o ganho nas propriedades físicas do concreto, visto que a queima da casca de arroz gera um produto rico em sílica, principal mineral repleto de atividade pozolânica. James e Rao (1986) apud Pouey (2006) definem a sílica da casca de arroz como fonte de sílica renovável, aproximadamente 93,57% da casca de arroz queimada é composta por sílica. A sílica da casca de arroz pozolânica diminui

os poros da pasta de cimento, melhorando a aderência entre pasta e agregado, além das reações de hidratação do concreto e consequente ganho de resistência (KUFFNER, 2013).

Neste sentido, este trabalho visa caracterizar o desempenho de concretos autoadensáveis, tanto no estado fresco como no estado endurecido, com a substituição do cimento Portland por cinza de casca de arroz.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz sobre as propriedades do concreto autoadensável, no estado fresco e endurecido, com o intuito de obter um concreto autoadensável sem perder suas propriedades básicas quanto comparadas ao CAA de referência (sem adição).

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir com êxito do objetivo geral desta pesquisa pressupõe-se alcançar os seguintes objetivos:

- Desenvolver traços de concreto autoadensável com diferentes teores de substituição de sílica da casca de arroz para a comparação com o traço de referência;
- Avaliar as propriedades no estado fresco e avaliar se estas propriedades também condizem com os parâmetros estabelecidos em norma;
- Avaliar a resistência à compressão axial e a tração por compressão diametral que as diferentes dosagens da sílica da casca de arroz fornecem ao concreto autoadensável;
- Comparar os resultados obtidos para cada traço, analisando e interpretando os valores obtidos em cada ensaio.

1.3 Justificativa

Apesar de o concreto ser um assunto bastante estudado no ramo tecnológico do país, há carência de estudos relacionados ao concreto autoadensável quando as pesquisas estão associadas às adições minerais. Por isso é de suma importância que os aspectos do CAA (características no estado fresco e endurecido) sejam estudados com uso da sílica de casca de arroz, com o propósito de reduzir o consumo de cimento que este tipo de concreto possui quando comparado ao concreto convencional.

Dessa forma, com pesquisas aprofundadas nos aspectos do concreto autoadensável, acredita-se que este possa ser utilizado em maior proporção na região, possibilitando obras de maior qualidade e durabilidade, além de menor tempo de execução. O uso da sílica da casca de arroz deve minimizar os custos do CAA, uma vez que este possui custos mais elevados quando comparado ao concreto convencional CCV, já que sua composição demanda altos teores de aditivo e alto consumo de cimento por metro cúbico.

1.4 Delimitações do Trabalho

A metodologia de pesquisa apresentada neste trabalho se limita em:

- Utilização de sílica de casca de arroz para a substituição parcial do cimento;
- Cálculo de traços a partir de 5% até 15% de substituição do cimento;
- Utilização de agregado graúdo com diâmetro máximo de 19 mm;
- Utilização de agregado miúdo (areia fina e areia média);
- Utilização de aditivo superplastificante MC-Power Flow 3100;
- Utilização de Cimento Portland CP V – ARI Itambé;
- Utilização do traço referência estudado por Billberg et al (1999) apud Gettu e Agulló (2003);
- Realização de ensaios no estado fresco (Slump Flow Test, Slump Flow T50 Test, J-ring Test, V-funnel Test e L-box Test);

- Realização de ensaios no estado endurecido (compressão axial e tração diametral);
- Rompimento de corpos de prova com 7, 28 e 63 dias de idade.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é composto por cinco capítulos. No capítulo 1 o assunto da pesquisa é discutido através de uma explanação geral, apresentação dos objetivos, justificativa da pesquisa e as delimitações do trabalho.

No segundo capítulo serão apresentadas as referências bibliográficas pertinentes ao tema, esclarecendo cada etapa da pesquisa.

No capítulo 3 será descrita a metodologia empregada, com todos os materiais e técnicas necessárias para alcançar os resultados deste trabalho.

No quarto capítulo serão apresentados os resultados no estado fresco e endurecido obtidos durante todo o estudo.

Por fim, no capítulo 5 serão as conclusões observadas durante a realização de todos os ensaios e testes deste estudo sobre o concreto autoadensável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definições

O concreto autoadensável (CAA) é caracterizado como um dos desenvolvimentos mais revolucionários na indústria cimentícia por várias décadas. De acordo com EFNARC (2002), o concreto só é considerado autoadensável quando atinge os três parâmetros que o definem simultaneamente, ou seja, tenha fluidez, habilidade de passar por entre as armaduras (coesão para que a mistura escoe) e resistência à segregação. É um concreto capaz de compactar-se em todo canto da fôrma apenas com seu peso próprio, sem carência de equipamentos para vibração (OKAMURA, 1997).

A viscosidade plástica, ou fluidez “é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de fluir dentro da fôrma e preencher todos os espaços” (TUTIKIAN E DAL MOLIN 2008, p. 9). Para os autores essa capacidade do CAA preencher os espaços sem bolhas de ar ou formações de falhas, é um fator que evidencia a qualidade final do concreto. Existem diferentes ensaios que possibilitam a avaliação da fluidez do CAA, entre eles, Slump Flow Test, Slump Flow T₅₀ Test, J-ring Test, V-funnel Test e L-box Test. Os dois primeiros normatizados pela NBR 15823-1/2010 da ABNT, e os demais pela NBR 15823-3/2010, 15823-5/2010 e 15823-4/2010 da ABNT, respectivamente.

A habilidade passante, para Tutikian e Dal Molin (2008, p. 9), “é a propriedade que caracteriza a capacidade da mistura de escoar pela fôrma, passando por entre as armaduras de aço sem obstrução do fluxo ou segregação”. De acordo com os autores,

o CAA não pode submeter-se a ajuda externa para o preenchimento das fôrmas, ou seja, o uso de vibradores, ou qualquer forma de compactação é proibida. Os ensaios que possibilitam a verificação da habilidade passante do CAA são: J-ring Test e L-box Test. Normatizados pela NBR 15823-3/2010 e 15823-4/2010 da ABNT, respectivamente.

E por fim, a resistência à segregação, “é a propriedade que define a capacidade do CAA de se manter coeso ao fluir dentro das fôrmas, passando ou não por obstáculos” (TUTIKIAN E DAL MOLIN 2008, p. 9). O CAA não deve segregar ao ser lançado para as fôrmas, para os autores, a segregação representa a separação do agregado graúdo da argamassa. Não existe ensaio regulamentado específico para a observação deste fator, porém ele pode ser notado visualmente em todos os ensaios já citados. Na Tabela 1 é possível observar cada ensaio proposto e a propriedade a ser verificada, de acordo com Tutikian e Dal Molin (2008).

Tabela 1 – Ensaios e suas propriedades

	Ensaio	Propriedade
1	Slump Flow Test	Fluidez / Segregação
2	Slump Flow T ₅₀ Test	Fluidez / Segregação
3	J-ring Test	Fluidez / Habilidade passante / Segregação
4	V-funnel Test	Fluidez / Segregação
5	L-box Test	Fluidez / Habilidade passante / Segregação

Fonte: Adaptado de Tutikian e Dal Molin (2008).

Conforme norma regulamentadora do CAA, NBR 15823-1/2010 da ABNT, ele deve ser classificado em funções dos ensaios realizados no estado fresco, descritos na Tabela 1. As Tabelas 2 a 6 demonstram a classificação de acordo com cada ensaio.

Tabela 2 – Classes de espalhamento (Slump Flow Test)

Classe	Espalhamento (mm)	Método de ensaio
SF1	550 a 650	NBR 15823-2 da ABNT
SF2	660 a 750	
SF3	760 a 850	

Fonte: Adaptado de NBR 15823-1/2010 da ABNT.

Tabela 3 – Classes de viscosidade plástica aparente (Slump Flow T₅₀ Test)

Classe	T ₅₀ (s)	Método de ensaio
VS1	≤ 2	NBR 15823-2 da ABNT
VS2	> 2	

Fonte: Adaptado de NBR 15823-1/2010 da ABNT.

Tabela 4 – Classes de habilidade passante pelo anel J (J-ring Test)

Classe	Anel J (mm)	Método de ensaio
PJ1	0 a 25 com 16 barras de aço	NBR 15823-3 da ABNT
PJ2	25 a 50 com 16 barras de aço	

Fonte: Adaptado de NBR 15823-1/2010 da ABNT.

Tabela 5 – Classes de habilidade passante pela caixa L (L-box Test)

Classe	Caixa L (H1/H2)	Método de ensaio
PL1	≥ 0,80 com 2 barras de aço	NBR 15823-4 da ABNT
PL2	≥ 0,80 com 3 barras de aço	

Fonte: Adaptado de NBR 15823-1/2010 da ABNT.

Tabela 6 – Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (V-funnel Test)

Classe	Funil V (s)	Método de ensaio
VF1	< 9	NBR 15823-5 da ABNT
VF2	9 a 25	

Fonte: Adaptado de NBR 15823-1/2010 da ABNT.

De acordo com Gomes e Barros (2009), a fluidez é obtida com o uso de aditivos superplastificantes, ao mesmo tempo, a coesão é a consequência da adição mineral de granulometria muito fina. Os autores ainda defendem que uma das características do CAA é uma mistura com maior volume de pasta em relação ao volume de agregado, quando comparado ao concreto convencional vibrado (CCV).

As propriedades citadas a cima, assim como suas classificações, estão diretamente relacionadas com a resistência mecânica do CAA no estado endurecido, segundo Kuffner (2013) o concreto pode aparentar dosagem correta no canteiro de obras, mas quando lançado sofrer falhas pela inadequação da dosagem do traço. A

autora ainda defende que o atendimento dos três parâmetros é fundamental, para que o CAA não possua artifícios de correção, como uso de vibradores no caso de falta de fluidez.

2.2 Vantagens do CAA em comparação ao Concreto Convencional Vibrado

As vantagens da utilização do concreto autoadensável são listadas por inúmeros autores, entre eles Tutikian e Dal Molin (2008) e Gomes e Barros (2009). A principal delas é apontada por Gomes e Barros (2009) como a eliminação do processo de vibração do concreto sem a interferência do preenchimento completo das fôrmas. Tal vantagem culmina em várias outras, conforme observado na Tabela 7.

Tabela 7 – Relação das vantagens do CAA

Vantagem	Motivo
Aceleração da construção	Lançamento rápido do concreto, dispensa adensamento
Redução da mão de obra	Eliminação da vibração dispensa uso de vários trabalhadores
Melhora do acabamento final	Adensamento homogêneo reduz consideravelmente falhas
Aumento da durabilidade	Fácil adensamento evita falhas e vazios causados pela má vibração
Formas e dimensões diversas	Preenche fôrmas curvas e esbeltas com altas taxas de armadura
Segurança	Diminuição do número de trabalhadores
Eliminação do barulho causado pela vibração	Não necessita de vibradores
Ganho ecológico	Utiliza na sua composição teores altos de resíduos industriais
Redução do custo final	Somadas todas as vantagens mencionadas

Fonte: Adaptado de Tutikian e Dal Molin (2008).

O Concreto Convencional Vibrado (CCV) é considerado um concreto de uso corrente na construção civil, sem qualquer característica especial, segundo a Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem – ABESC, é um concreto desenvolvido a partir de 20 MPa de resistência e pode ser confeccionado na obra ou por concreteiras. Seu *Slump Test* varia de 40 a 70 mm, sendo imprescindível a vibração da forma para precisa concretagem e preenchimento do molde.

A ausência da vibração no CAA garante o uso de menos operários para a concretagem, além da diminuição do ruído na obra. Trabalhar com um concreto mais fluído garante uma maior eficiência em obra, ou seja, menos horas de concretagem. O concreto autoadensável, assim como o concreto convencional vibrado, também possibilita a utilização de resíduos industriais em sua mistura, contribuindo para a preservação do meio ambiente, essas são algumas das vantagens indicadas por Gomes e Barros (2009). Tutikian e Dal Molin (2008) acrescentam que as adições de resíduos industriais garantem a coesão da mistura, delegando ao concreto somente a função de garantir resistência, dessa forma, a quantidade deste pode ser diminuída, reduzindo também, o custo final do produto.

2.3 Exemplos de obras com utilização de CAA

O concreto autoadensável foi declarado o avanço mais inovador na construção civil por múltiplas décadas. Foi originalmente desenvolvido para compensar uma crescente escassez de mão-de-obra qualificada. Provou ser uma tecnologia benéfica por uma série de fatores (EFNARC, 2002), conforme destacado no item 2.2.

Gomes e Barros (2009) apontam que o CAA foi desenvolvido no Japão na década de 80, pelo professor Hajime Okamura, nasceu da necessidade da época de construções mais duráveis e de menores dimensões, com menor tempo de execução. Gomes e Barros (2009) avaliam que a durabilidade das estruturas depende da qualidade da compactação, devendo esta ser realizada por operários especializados. Na década de 80, a indústria japonesa sofria déficit de mão de obra capacitada, uma das razões pela qual levou Okamura a desenvolver um concreto que não dependesse desse critério.

Kuffner (2013) relata que o CAA só começou a ganhar espaço na indústria construtiva após o término da construção da ponte Akashi-Kaikyo, em 1998. Esta ponte possui um vão de 1991 metros e foram utilizados 290.000 m³ de concreto autoadensável para suas ancoragens, conforme Figura 1.

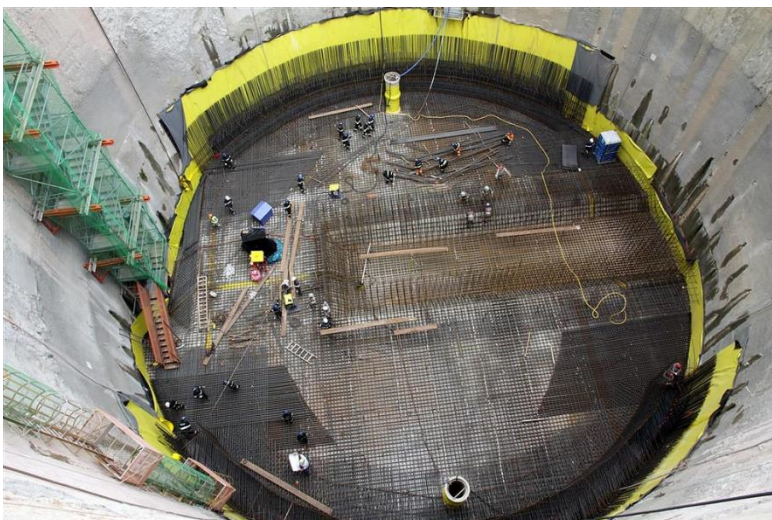
Figura 1 – Ponte Akashi-Kaikyo, fundada em 1998.



Fonte: Engenharia e Construção (2011).

No Brasil, uma das obras que mais se utilizou CAA, foi o metrô de São Paulo. Segundo a Revista Técnica (2008), foram utilizados cerca de 8.000 m³ de CAA para concretar uma laje de aproximadamente 2 mil m² de superfície e 3,5 metros de altura. A estrutura da laje pode ser observada na Figura 2, e seu dimensionamento pode ser comparado ao tamanho dos operadores trabalhando em sua concretagem.

Figura 2 – Laje do metrô de São Paulo com concreto autoadensável



Fonte: Faria (2008).

2.4 Materiais utilizados

Para Tutikian e Dal Molin (2008), os materiais para preparação do CAA são os mesmos utilizados no CCV, o que difere um concreto do outro é a quantidade de finos e de aditivos utilizados. Gomes e Barros (2009) defendem que as propriedades autoadensáveis do concreto só são alcançadas com o conhecimento dos materiais constituintes, além de suas proporções e efeitos.

Domone (2006) analisou 68 misturas de concreto autoadensável de diferentes países. Para o autor, as maiores diferenças do CAA para o Concreto Convencional Vibrado são: a redução da quantidade de agregado graúdo, maior conteúdo de pasta, alto teor de partículas finas, baixa relação a/c e alta dosagem de aditivos superplastificantes. Essas diferenças garantem que o concreto ganhe fluidez, habilidade de passar com obstáculos sem segregação do agregado graúdo, ou seja, as principais características que um CAA tem que alcançar para ser considerado autoadensável.

Areia, agregados graúdos e cimento Portland, além de superplastificantes e adições minerais são os materiais necessários para produzir um concreto autoadensável, de acordo com Mehta e Monteiro (2014). Nos itens 2.4.1 a 2.4.6 estão descritos os materiais necessários para a confecção do CAA.

2.4.1 Cimento

Para Cavalcanti (2006, p. 30) “não existe um cimento específico para o CAA”, portanto não há restrições para a dosagem do concreto autoadensável quanto ao cimento, qualquer classificação pode ser utilizada, desde que atinja os parâmetros para o CAA estabelecidos na NBR 15823-1/2010, da ABNT.

Ao mesmo tempo, para Tutikian e Dal Molin (2008), existem fatores que podem alterar a qualidade do concreto. Para que o CAA esteja viável para uso os autores defendem que deve-se utilizar um cimento de granulometria adequada e superfície específica elevada, além de ter controle da quantidade de aluminato tricálcico (C_3A). Os autores defendem que:

Quanto menor for a quantidade de C_3A mais fácil será seu controle reológico, bem como o enrijecimento da mistura de dará em um período mais longo. Na prática, cimentos com teores de C_3A maiores que 10% podem resultar em rápida perda de fluidez, dificultando a aplicação do CAA em obras (TUTIKIAN E DAL MOLIN 2008, p. 28).

A qualidade do cimento Portland é estabelecida por diferentes tipos, na Tabela 8 é possível observar a diferenciação entre as classes deste.

Tabela 8 – Classes de cimento Portland

CP I	Cimento Portland comum
CP I-S	Cimento Portland comum com adição
CP II-E	Cimento Portland composto por escória
CP II-Z	Cimento Portland composto por pozolana
CP II-F	Cimento Portland composto por fíler
CP III	Cimento Portland de Alto Forno
CP IV	Cimento Portland com pozolana
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CP RS	Cimento Portland de Resistência aos sulfatos
CP BC	Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação
CP B	Cimento Portland Branco

Fonte: Adaptado de NBR 5732/1991, 11578/1991, 5735/1991, 5736/1991, 5733/1991, 5737/1992, 13116/1994, 13989/1993 da ABNT.

Em relação a granulometria, ou grau de finura, para Tutikian e Dal Mollin (2008, p. 28), “quanto maior a superfície específica do cimento, maior a quantidade dessas partículas em contato com a água”, o que aumenta a colisão entre as partículas. Esse comportamento ameniza a tensão de escoamento e amplia a viscosidade. Dessa forma, os autores alegam que, a demanda por finos do CAA é devido a sua necessidade de alta coesão, “portanto cimentos de maior superfície específica são mais apropriados” (TUTIKIAN E DAL MOLIN 2008, p. 28).

Gomes e Barros (2009) relatam que uma das características do CAA é uma mistura com maior volume de pasta em relação ao volume de agregado, quando comparado ao concreto convencional vibrado (CCV), ou seja, o CAA tem um consumo maior de cimento que o CCV, em torno de 30% a mais, conforme Coutinho (2011), e

até 600 kg/m³. Para a autora, os CAA's que precisam se movimentar por longas distâncias horizontais demandam maior teor de finos, os que não precisam desta capacidade podem ter o teor de finos cerca de 10% a mais que os CCV's.

2.4.2 Filler calcário

Filler calcário é o material resultante da moagem de calcário, basalto ou materiais carbonáticos. Ele possui uma granulometria muito fina, o que faz dele um material capaz de aumentar a trabalhabilidade, diminuir a capilaridade e a permeabilidade tanto em argamassas quanto em concretos. A empresa Geocal Minerações alega que este material enquadra-se na zona 3 da NBR 7211/2005 da ABNT, por se tratar de uma agregado com granulometria constante. Esta ainda se refere ao filler calcário como um material inovador na ordem de substituição à areia natural, devido ao meio de extração dos dois materiais.

2.4.3 Adições Minerais CCA

Segundo Tutikian e Dal Mollin (2008), são utilizados aditivos ou adições minerais para aumentar a coesão do concreto e conter a segregação do agregado gráudo. A cinza da casca de arroz é considerada uma adição quimicamente ativa do tipo pozolânica, pois reage quimicamente com o Ca(OH)₂, produto da hidratação do cimento Portland para produzir compostos resistentes, conforme NBR 12653/1992 da ABNT.

Metha e Monteiro (2014, p.341) informam que “cada tonelada de arroz colhido produz cerca de 200 kg de casca, que na combustão produz aproximadamente 40 kg de cinza”. A cinza da casca de arroz “consiste essencialmente de sílica pura na forma não-cristalina” conforme Metha e Monteiro (2014, p. 330).

A CCA tem procedência na calcinação da casca de arroz, de acordo com Tutikian e Dal Mollin (2008) e possui aspecto alveonar e áspero. Massa específica de 2,20 a 2,60 kg/dm³ e superfície específica entre 50.000 a 100.000 m²/kg. O tamanho médio das partículas é variável de acordo com o tempo de moagem. A cinza tem de

ser moída em um tamanho muito fino para que consiga desenvolver alguma atividade pozolânica (METHA E MONTEIRO, 2014).

2.4.4 Agregados

Bauer (2008) relata que o agregado é um material fragmentado, sem coesão, com pouca atividade química. Para Metha e Monteiro (2014) os agregados não reagem quimicamente com a água e por isso são tratados somente como material de enchimento inerte do concreto. Eles são classificados por Bauer (2008) segundo sua origem, suas dimensões de partículas e peso específico aparente. Na Figura 3 é possível observar um desenho esquemático da classificação dos agregados.

Figura 3 – Classificação dos agregados

ORIGEM	DIMENSÃO DAS PARTÍCULAS	PESO ESPECÍFICO APARENTE
NATURAIS	MIÚDO	LEVES
INDUSTRIALIZADOS	GRAÚDO	MÉDIOS
		PESADOS

Fonte: Adaptado de Bauer (2008)

Quanto a sua origem os agregados são classificados como naturais ou industrializados. Os agregados naturais são aqueles encontrados no ambiente, entre eles, areia e cascalho. Já os industrializados têm sua composição obtida por processos industrializados, a matéria prima pode ser: rochas, escória de alto-forno e argila (BAUER, 2008).

Quanto a dimensão das partículas os agregados são classificados por miúdos ou graúdos, para Bauer (2008) os agregados miúdos são as areias e os graúdos os cascalhos e as britas. Para a classificação quanto ao peso específico aparente, deve-se fazer ensaios em cada material, mas como exemplo o autor aponta que a areia é classificada como médio peso específico aparente e a brita como pesado.

Metha e Monteiro (2014) defendem que o agregado não deve ser tratado com menos importância do que o cimento, uma vez que interfere significativamente na

trabalhabilidade do concreto, exerce influência na resistência do mesmo, assim como na durabilidade e estabilidade dimensional.

2.4.4.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo empregado para a composição do concreto é a areia, Bauer (2008, p. 78) define geologicamente areia como um “sedimento clástico inconsolidado, de grãos, em geral quartzosos, de diâmetro entre 0,06 e 2,0 mm”. O autor ainda destaca que as areias podem ser caracterizadas através de suas curvas granulométricas, e são divididas basicamente em três faixas: areia fina com granulometria de 0,15 a 0,6 mm; areia média de 0,6 a 2,4 mm e areia grossa de 2,4 a 4,8 mm. Já a NBR 7211/2009 da ABNT gradua a areia em quatro faixas, conforme Tabela 9, muito fina; fina; média e grossa, variando a granulometria de 0,15 a 6,3 mm.

Bauer (2008) afirma que para o uso do agregado miúdo areia em concretos, a norma, NBR 7211/2009 da ABNT, estabelece que a curva granulométrica deve estar entre os limites inferior e superior da Tabela 9. Esses limites, segundo o autor, estabelecem os fusos granulométricos, conforme Figura 4, que delimitam as faixas extremas de granulometria: G (grossa) e MF (muito fina).

Bauer (2008) complementa relatando que o módulo de finura de uma areia bem graduada, conforme NBR 7211/2009 da ABNT varia entre os limites apresentados na Tabela 9. Bartos (2000) justifica que areias com módulo e finura superior a 3, ou seja, consideradas muito grossas, podem gerar segregação do concreto, portanto devem ser evitadas na confecção do CAA. O concreto autoadensável necessita de finos na sua composição para aumentar a coesão da mistura e, por consequência, a resistência à segregação. Gómes e Maestro (2005) defendem que o módulo de finura não deve ter variações maiores que $\pm 0,20$ para que as propriedades reológicas possam ser mantidas durante a produção.

O agregado miúdo passante da peneira 0,125 mm é um adicional de fíler para fins de dosagem, dessa forma, juntamente com as partículas de finos e aglomerantes, aumentam a coesão e viscosidade do concreto (EFNARC, 2002).

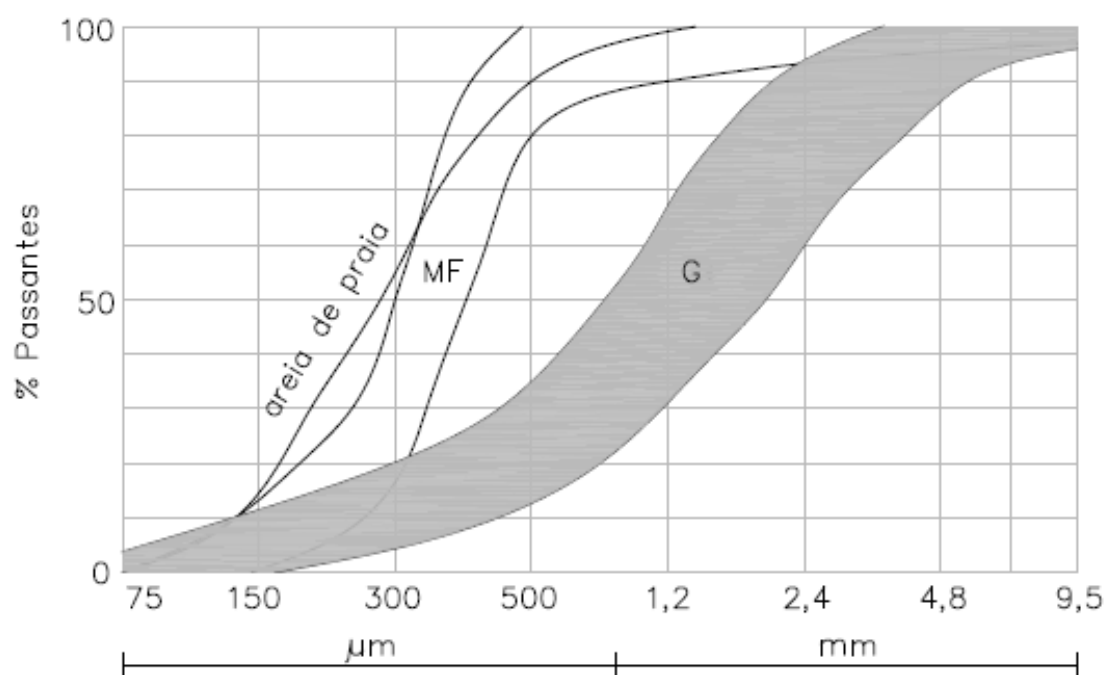
Otaviano (2007) apud Tutikian e Dal Molin (2008) destaca a necessidade do controle da umidade do agregado miúdo. A umidade pode causar uma alteração na fluidez da mistura, segundo o autor. Damone (2003) alega que erros de 0,5 % na estimativa da umidade pode variar o consumo de água em 8 kg/m³ de concreto, além de alterar o teste de espalhamento (*Slump Test*) em até 45 mm.

Tabela 9 – Porcentagens retidas em cada faixa granulométrica de areia

PENEIRAS (mm)	PORCENTAGENS RETIDAS			
	FAIXA 1 (muito fina)	FAIXA 2 (fina)	FAIXA 3 (média)	FAIXA 4 (grossa)
6,3	0 a 3	0 a 7	0 a 7	0 a 7
4,8	0 a 5	0 a 10	0 a 11	0 a 12
2,4	0 a 5	0 a 15	0 a 25	5 a 40
1,2	0 a 10	0 a 25	10 a 45	30 a 70
0,6	0 a 20	21 a 40	41 a 65	66 a 85
0,3	50 a 85	60 a 88	70 a 92	80 a 95
0,15	85 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100

Fonte: Adaptado de Bauer (2008).

Figura 4 – Faixas granulométricas zonas 1 a 4



Fonte: Bauer (2008).

Tabela 10 – Limites do módulo de finura para cada faixa granulométrica

Muito fina	FAIXA 1	de 1,35 a 2,25
Fina	FAIXA 2	de 1,71 a 2,85
Média	FAIXA 3	de 2,11 a 3,38
Grossa	FAIXA 4	de 2,71 a 4,02

Fonte: Bauer (2008).

2.4.4.2 Agregado graúdo

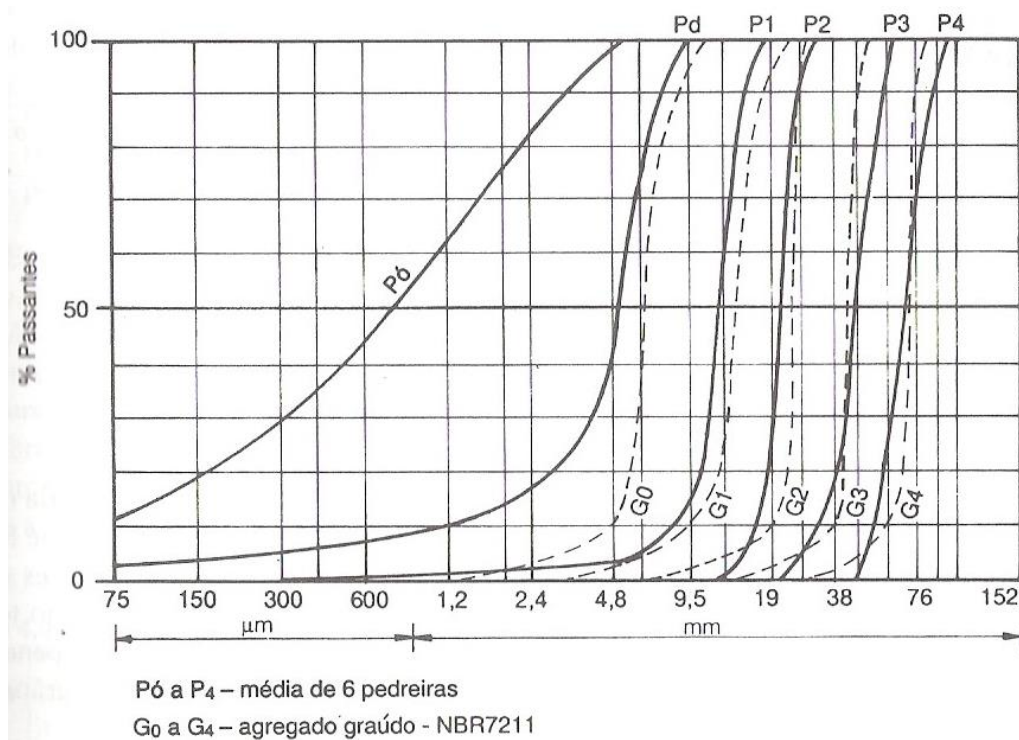
O agregado graúdo utilizado para a composição do CAA é a brita. Bauer (2008) define brita como um produto da moagem de rocha com tamanhos entre 2,4 e 64 mm, segundo as divisões padronizadas da ABNT constantes nas NBR 5564/1991 e 7211/2005”.

A brita, assim como a areia do agregado miúdo, é subdivida em faixas granulométricas. Na Figura 5 estão representadas as curvas das graduações de 0 a 4, conforme NBR 7211/2005 da ABNT, em tracejado. Em traço cheio, estão representadas as curvas granulométricas de britas produzidas em seis pedreiras da região da Grande São Paulo, mais a representação da curva granulométrica do pó de brita, ambas curvas a título de comparação com a norma.

A NBR 7211/2005 da ABNT padroniza a pedra britada para uso em concreto. De acordo com Bauer (2008), são utilizados principalmente o pedrisco, a pedra 1 e a pedra 2. É também empregado o pó de brita em larga escala.

Tutikian e Dal Molin (2008) afirmam que “a forma e a textura superficial do agregado são fatores relevantes no comportamento mecânico”. Dessa forma, segundo os autores, indica-se a utilização para o CAA se agregados com coeficiente de forma o mais próximo possível de 1.

Figura 5 – Curvas granulométricas na norma e pedreiras



Fonte: Bauer (2008).

2.4.5 Aditivo superplastificante

Para Tutikian e Dal Molin (2008) os aditivos são uma especificidade do CAA para o CCV. São dois os aditivos mais comumente utilizados: os superplastificantes e os modificadores de viscosidade. Para os autores, os superplastificantes alcançam alta fluidez e os modificadores de viscosidade aumentam a coesão.

Aditivo é:

Todo o produto não indispensável à composição e finalidade do concreto, que colocado na betoneira imediatamente antes ou durante a mistura do concreto, em quantidades geralmente pequenas e bem homogeneizado, faz aparecer ou reforça certas características". (BAUER 2008, p. 135).

Metha e Monteiro (2014) definem superplastificantes como aditivos redutores de água com alta eficiência, pois possuem capacidade de reduzir a água de amassamento em até 4 vezes. Tutikian e Dal Molin (2008) defendem que este tipo de aditivo melhora a dispersão das partículas de cimento na comparação a outros tipos de aditivos.

2.4.6 Água

A água utilizada para a confecção do CAA é a mesma para o concreto convencional vibrado. Para Kuffner (2013, p. 30), a água deve ser “doce e cristalina, sem qualquer tipo de resíduo, seja ele orgânico ou não, para que não afete as propriedades físicas e mecânicas, tanto no estado fresco, quanto no endurecido”.

2.5 Influência da CCA no CAA

Tutikian e Dal Mollin (2008) apontam os efeitos da CCA (cinza de casca de arroz) no estado fresco e endurecido quando substituído por parte do cimento da mistura. No estado fresco os autores apontam que ocorre:

- Aumento da coesão;
- Diminuição marcante da exsudação e segregação;
- Perda de fluidez devido à forma e textura das partículas;
- Aumento no consumo de superplastificante.

Já no estado endurecido os autores observaram:

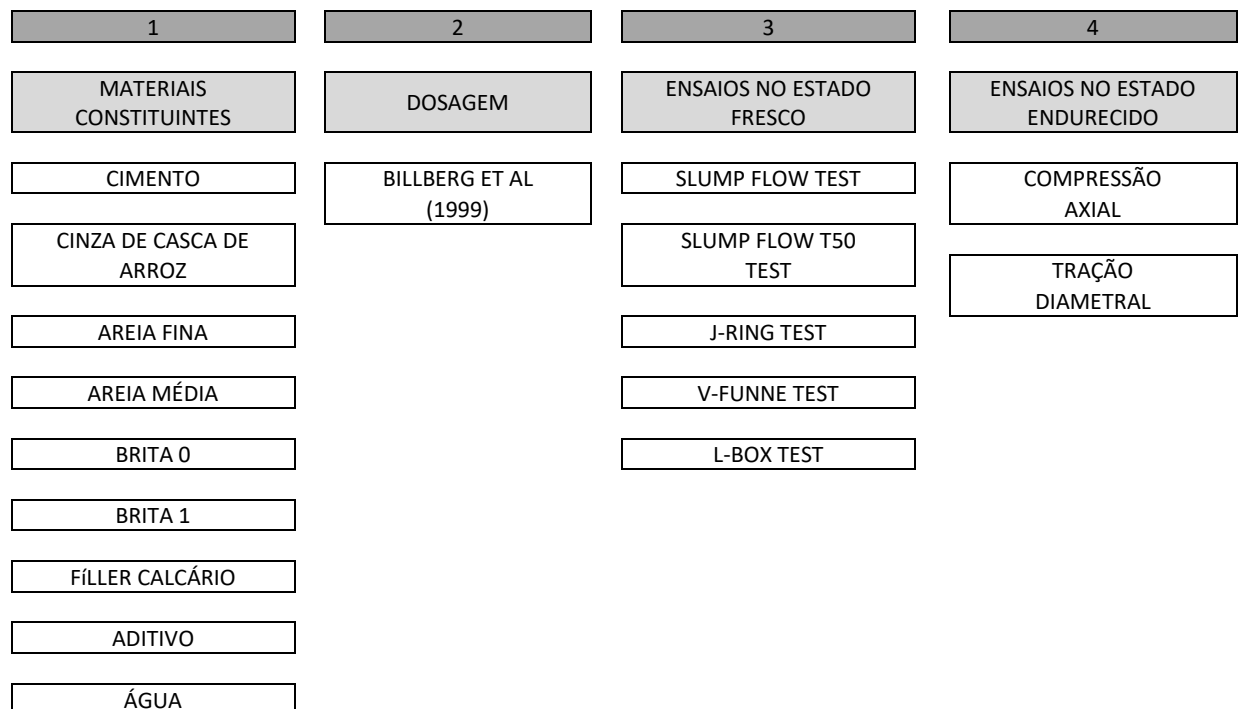
- Melhoria notável da resistência à compressão;
- Melhoria da durabilidade.

Diversos autores têm estudado os efeitos da CCA no concreto autoadensável, Mehta e Folliard (2002) relatam os aspectos da durabilidade nas misturas de cimento Portland com cinzas de casca de arroz. Zhang e Malhotra (1995) confirmam a atividade pozolânica da cinza, com grandes semelhanças à sílica ativa, já usualmente utilizada.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada divide-se em 4 etapas, conforme observado no fluxograma da Figura 6. Na primeira etapa foram detalhados os materiais empregados para a confecção do concreto autoadensável (CCA), sendo eles: cimento, adição mineral de fíler calcário e cinza de casca de arroz, areia fina, areia média, brita 0, brita 1, aditivo superplastificante e água.

Figura 6 – Fluxograma metodologia do programa experimental



Fonte: Da autora.

Já a segunda etapa consiste na definição e testes de um traço de referência, já estudado por Billberg et al (1999) apud Gettu e Agulló (2003), com variações para adaptação aos materiais do Laboratório de Tecnologias da Construção (LATEC), e posterior substituição em volume de cimento por cinza de casca de arroz, nas porcentagens 5%, 10% e 15%. A terceira etapa descreve os ensaios realizados com o CCA no estado fresco a fim de verificar a fluidez, a segregação e a capacidade do concreto de passar por obstáculos. Os ensaios no estado endurecido foram descritos na quarta etapa, entre eles estão o ensaio de compressão axial e tração diametral.

3.1 Materiais constituintes

Neste item são descritos os materiais constituintes do programa experimental desta pesquisa. Todos os materiais mencionados neste item são comercializados no Brasil, mais precisamente na região do Vale do Taquari – Rio Grande do Sul. Todos os ensaios relatados neste capítulo foram realizados no Laboratório de Tecnologias da Construção – LATEC do Centro Universitário UNIVATES, localizado na cidade de Lajeado – RS.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado para a composição do concreto autoadensável foi o cimento Portland CP V-ARI Itambé, conforme Figura 7, por ser um cimento com poucas adições e que atinge altas resistências já nos primeiros dias de cura, (ABCP 2002). De acordo com a NBR 5733/1991 ABNT, concretos convencionais com a utilização de CP V-ARI devem atingir as resistências à compressão conforme exigências mecânicas da norma, descritas na Tabela 11.

Tabela 11 – Exigências mecânicas

Resistência à compressão	1 dia de idade	14,0 MPa
	3 dias de idade	24,0 MPa
	7 dias de idade	34,0 MPa

Fonte: Adaptado de NBR 5733/1991 da ABNT.

Figura 7 – Cimento Portland CP V-ARI Itambé



Fonte: Da autora.

Foi realizado o ensaio de caracterização da massa específica do cimento Portland CP V-ARI, a fim de verificar se o valor informado pelo fabricante era válido. O ensaio foi efetuado em conformidade com a norma NBR NM 23/2001 da ABNT, resultando em uma massa específica de $3,1 \text{ g/cm}^3$, sendo esta especificada pelo fabricante como $3,12 \text{ g/cm}^3$.

3.1.2 Adições minerais CCA

A cinza de casca de arroz utilizada para esta pesquisa foi da empresa Pilleco Nobre. As composições químicas e físicas deste material foram fornecidas pelo fabricante nas Tabelas 12 e 13 a seguir. Foi necessário realizar o ensaio de massa específica, segundo os preceitos da NBR NM 23/2001 da ABNT, para que a cinza fosse substituída, em valores corretos de massa, pelo cimento. A massa específica da cinza da casca de arroz resultante do ensaio foi de $2,15 \text{ g/cm}^3$. Na Figura 9 pode-se observar o ensaio realizado, já o aspecto do material (coloração e granulometria) do material pode ser observado na Figura 10.

Tabela 12 – Composição química da cinza de casca de arroz

SiO ₂	90,67 %
K ₂ O	2,17 %
CaO	1,12 %
P ₂ O ₅	0,58 %
SO ₃	0,28 %
Cl	0,22 %
MnO	0,19 %
MgO	0,18 %
Al ₂ O ₃	0,14 %
Fe ₂ O ₃	0,11 %
Rb ₂ O	0,01 %
Perda ao Fogo	4,32 %

Fonte: Pilecco Nobre.

Tabela 13 – Composição física da cinza de casca de arroz

Perda ao fogo (%)	< 5
Umidade (%)	< 3
pH	entre 8 e 10
Massa específica (g/cm ³)	2,16
Resíduo em peneira #325	< 5%
Teor de SiO ₂	> 90%
Ensaio CTAB(m ² /g)	10 à 12
Superfície específica BET (m ² /g)	15 à 20 m ² /g

Fonte: Pilecco Nobre.

Figura 8 – Ensaio da massa específica da cinza de casca de arroz



Fonte: Da autora.

Figura 9 – Cinza da casca de arroz Pilleco Nobre



Fonte: Da autora.

3.1.3 Filler calcário

O filler calcário utilizado foi da empresa UniCal, do tipo B, o mais fino, conforme Figura 10. Também foi realizado o ensaio de massa específica neste material, de acordo com a norma NBR NM 23/2001 da ABNT, resultando em uma massa específica de 2,55 g/cm³.

Figura 10 – Filler calcário UniCal-B



Fonte: Da autora.

3.1.4 Agregado miúdo

Para a composição do CAA foi utilizada uma areia média e fina proveniente do município de Estrela – RS. Foi realizada uma caracterização destes agregados segundo procedimentos normatizados descritos a seguir.

3.1.4.1 Massa específica

A massa específica da areia fina e média utilizadas foram obtidas conforme procedimento descrito na NBR 9776/1987 da ABNT, o ensaio pode ser observado na

Figura 11. Os resultados obtidos foram de $1,66 \text{ g/cm}^3$ para a areia fina e $1,35 \text{ g/cm}^3$ para a areia média.

Figura 11 – Ensaio da massa específica para as areias



Fonte: Da autora.

3.1.4.2 Massa unitária

O ensaio de massa unitária foi realizado de acordo procedimento indicado pela NBR NM 45/2006 da ABNT e observado na Figura 12. Conforme a norma estipula para materiais secos e soltos optou-se o procedimento pelo Método C. Para a areia fina obteve-se uma massa unitária de $1,10 \text{ g/cm}^3$, já para a areia média $1,25 \text{ g/cm}^3$.

Figura 12 – Ensaio da massa unitária para as areias



Fonte: Da autora.

3.1.4.3 Granulometria

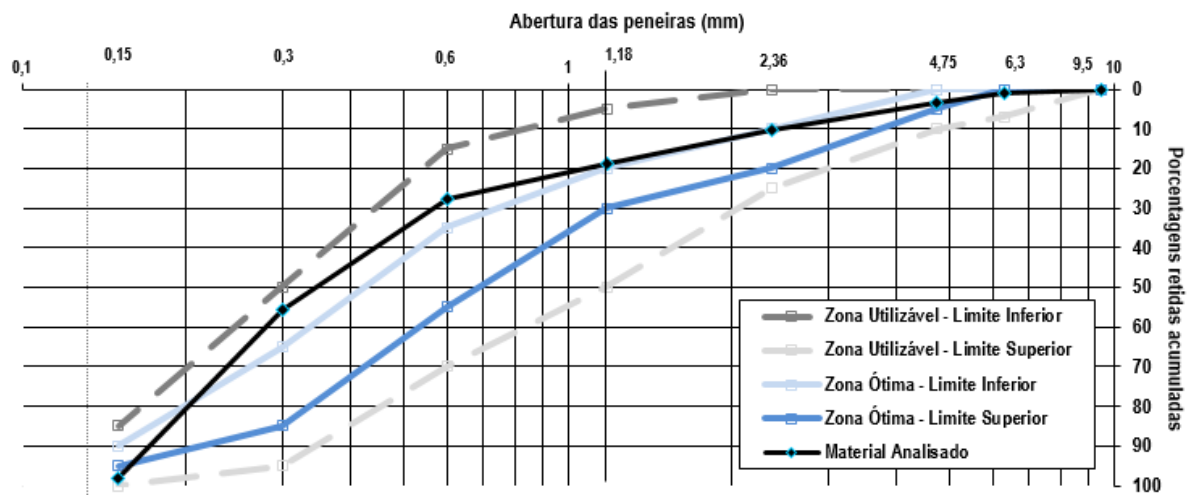
A granulometria dos agregados miúdos foi determinada através do procedimento descrito na NBR NM 248/2003 da ABNT. A fim de manter a veracidade do ensaio, o mesmo foi realizado duas vezes com amostras diferentes do mesmo agregado. No Apêndice A pode-se observar as tabelas com os resultados dos dois peneiramentos para cada areia respectivamente, já na Figura 13 observa-se imagens do ensaio e o Gráfico 1 e 2 revelam as curvas granulométricas das duas areias utilizadas.

Figura 13 – Ensaio de granulometria das areias



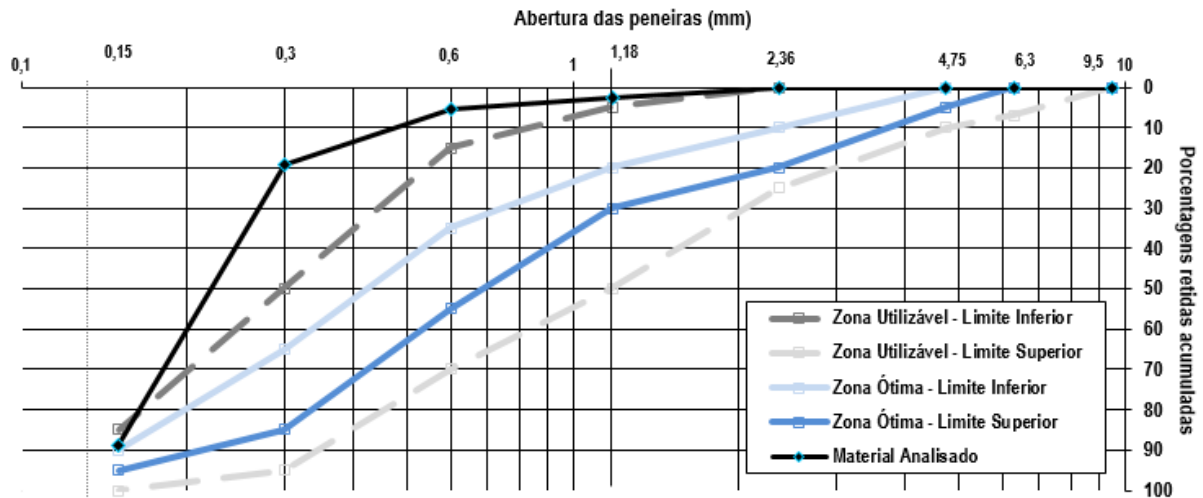
Fonte: Da autora.

Gráfico 1 – Granulometria da areia média



Fonte: Da autora.

Gráfico 2 – Granulometria da areia fina



Fonte: Da autora.

3.1.5 Agregado graúdo

Gómes e Maestro (2005) aconselham a utilização de um agregado graúdo com dimensão máxima inferior a $\frac{2}{3}$ do espaçamento entre barras e a $\frac{3}{4}$ do cobrimento mínimo de concreto. O autor descreve que na prática são utilizados agregados graúdos de dimensão máxima inferior ou igual a 19 mm, sendo habitualmente utilizados tamanhos entre 12,5 e 19 mm.

Para a composição do CAA estudado foram utilizadas duas britas basáltica proveniente do município de Lajeado – RS. Foram realizados procedimentos para caracterização destes agregados conforme itens descritos a seguir.

3.1.5.1 Massa específica

O procedimento realizado seguiu as diretrizes da NBR NM 53/2003 da ABNT. Na Figura 14 é possível observar a realização do ensaio que resultou em uma massa específica de 2,52 g/cm³ para a brita 0 utilizado e 2,49 g/cm³ para a brita 1.

Figura 14 – Ensaio da massa específica para as britas



Fonte: Da autora.

3.1.5.2 Massa unitária

A determinação da massa unitária do agregado graúdo ocorreu da mesma forma que do agregado miúdo, com o mesmo método desenvolvido para o procedimento, conforme descrito no item 3.1.4.2. A Figura 15 retrata o ensaio realizado para ambas as britas, resultando em uma massa unitária de $1,50 \text{ g/cm}^3$ para a brita 0 e $1,40 \text{ g/cm}^3$ para a brita 1.

Figura 15 – Ensaio de massa unitária das britas

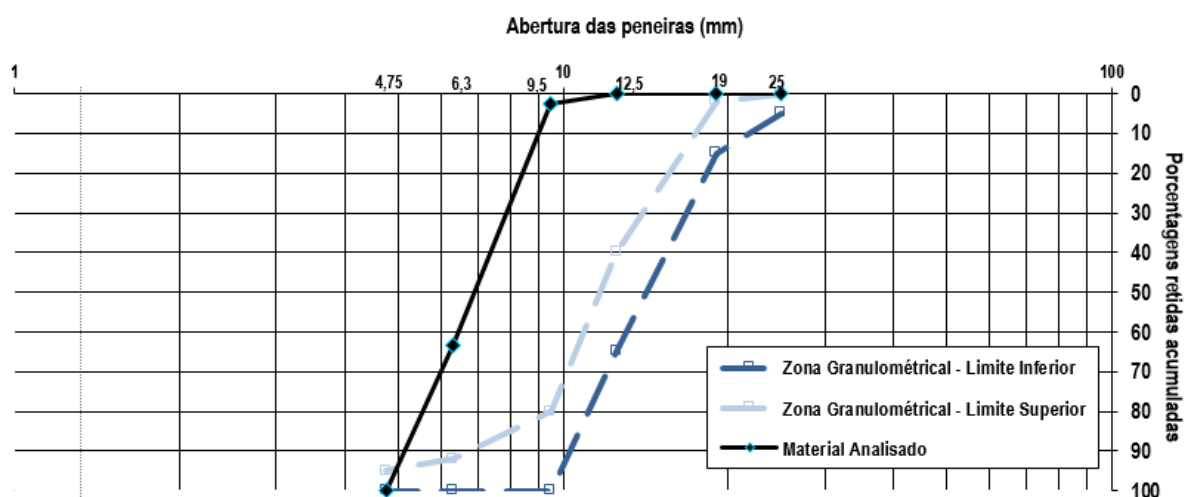


Fonte: Da autora.

3.1.5.3 Granulometria

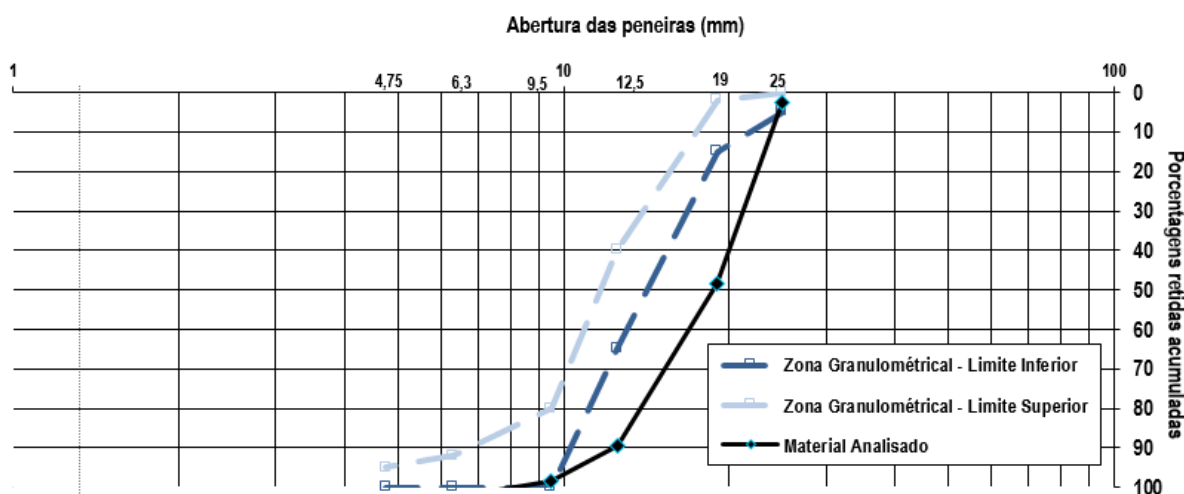
A determinação da granulometria do agregado graúdo ocorreu da mesma forma que a determinação para o agregado miúdo, utilizando a NBR NM 248/2003 da ABNT, descrito no item 3.1.4.3, contudo para o agregado miúdo foi utilizada uma amostra de 500 gramas e para o agregado graúdo uma amostra de 1 kg, não modificando em nada o procedimento do ensaio. No Apêndice B pode-se observar as tabelas com os resultados dos dois peneiramentos para cada brita respectivamente, já os Gráficos 3 e 4 revelam as curvas granulométricas das duas britas utilizadas.

Gráfico 3 – Curva granulométrica brita 0



Fonte: Da autora.

Gráfico 4 – Curva granulométrica brita 1



Fonte: Da autora.

3.1.6 Aditivo Superplastificante

Para essa composição de CAA foi utilizado um aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, por ser o mais utilizado na confecção do CAA, segundo Tutikian e Dal Molin (2008). O aditivo utilizado foi o MC-PowerFlow 3100 da MC-Bauchemie, algumas características fornecidas pelo fabricante constam na Tabela 14.

Tabela 14 – Características do fabricante do aditivo MC-PowerFlow 3100

Produto	Aspecto/cor	Dosagem recomendada (% SPC)	Massa específica g/cm ³ (NBR 10908)
MC-PowerFlow 3100	Líquido marrom	0,2 a 5,0 %	1,07

Fonte: Adaptado de MC-Bauchemie, 2017.

3.1.7 Água

A água que foi utilizada para a concretagem provem da rede de distribuição da cidade de Lajeado – RS.

3.2 Dosagem utilizada

A dosagem utilizada para este programa experimental baseou-se em estudos preliminares realizados por Billberg *et al.* (1999) apud Gettu e Agulló (2003). O autor apresentou um traço de CAA, conforme mostra na Tabela 15, porém ao ser realizado este traço (tentativa 1) houve segregação do material, uma vez que este possuía poucos materiais finos em sua mistura. Desta forma, optou-se por realizar uma adaptação deste traço. Esta adaptação do traço de referência foi feita através de testes práticos. A quantidade de finos foi aumentada adicionando areia fina e brita 0 ao traço, além de aumentar a quantidade de aditivo à mistura.

Após novo teste (tentativa 2) optou-se também por aumentar a relação a/c, já que a mistura apresentou coesão superior a necessária. Em consequência, obteve-se um traço referência fluído, coeso e resistente à segregação. Outra adaptação fundamental foi o peneiramento da brita 1, já que seu ensaio granulométrico apontou diâmetros maiores que 19 mm, o que é considerado o diâmetro máximo aconselhado para concretagens de concreto autoadensável. Por esta razão, foi peneirada toda a brita 1 utilizada para que não houvessem grãos com diâmetro maiores que 19 mm.

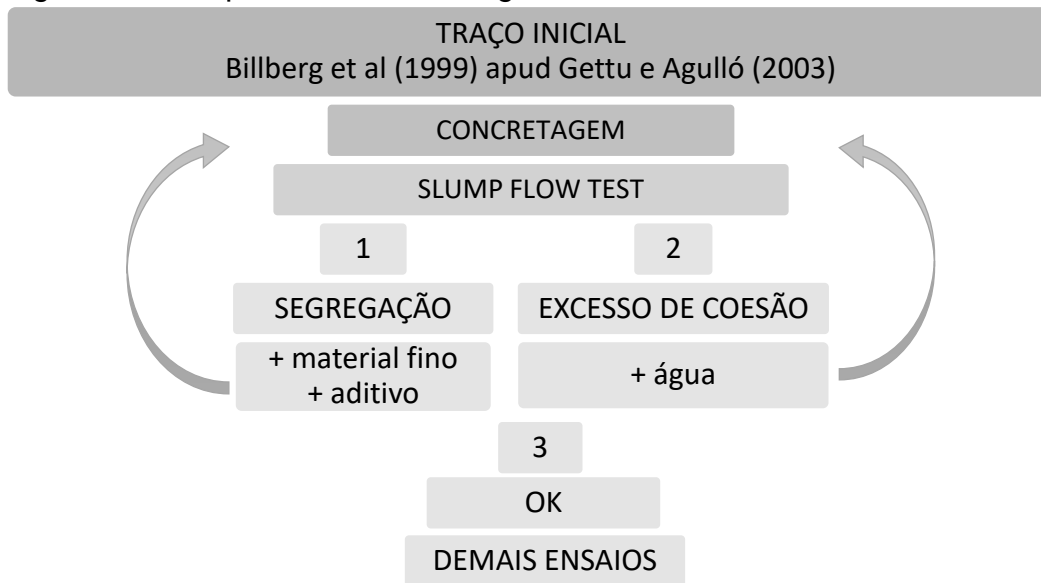
O esquema da metodologia utilizada pode ser observado na Figura 16, na qual é apresentado os passos que foram seguidos para se obter os traços resultantes deste estudo. No esquema pode-se observar que foram feitas duas tentativas de adaptação do traço até se alcançar um concreto autoadensável (tentativa 3). Os demais traços foram calculados com substituição em volume do cimento por cinza de casca de arroz nas porcentagens de 5, 10 e 15%. Os traços resultantes deste programa experimental também podem ser observados na Tabela 15.

Tabela 15 – Traços do programa experimental

Consumo kg/m ³	Billberg et al (1999)	Referência	5% CCA	10% CCA	15% CCA
Cimento	405	405	384,75	364,50	344,25
Cinza de casca de arroz	-	-	19,24	36,45	51,64
Fíler calcário	121	121	121	121	121
Areia fina	-	447,5	447,5	447,5	447,5
Areia média	737	447,5	447,5	447,5	477,5
Brita 0	-	366	366	366	366
Brita 1	732	366	366	366	366
Aditivo superplastificante	3,4	6,25	6,25	6,25	6,25
Relação a/c	0,4	0,45	0,45	0,45	0,45

Fonte: Da autora.

Figura 16 – Esquema da metodologia utilizada



Fonte: Da autora

3.3 Ensaios no estado fresco

3.3.1 Slump Flow Test

O ensaio Slump Flow Test é normalmente utilizado para medir a fluidez ideal do CAA. A determinação deste valor ideal se dá através da medição em dois sentidos perpendiculares do espalhamento concreto sobre uma chapa metálica. Este ensaio é normatizado pela NBR 15823-2/2010 da ABNT.

Figura 17 – Perspectiva e execução do ensaio



Fonte: NBR 15823-2/2010 da ABNT.

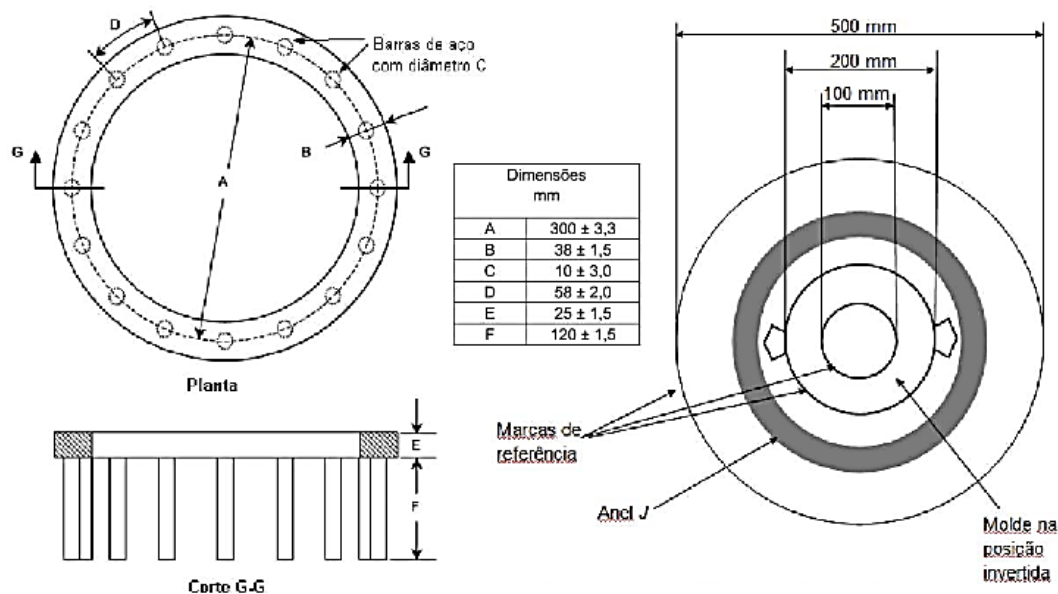
3.3.2 Slump Flow T50 test

No ensaio Slump Flow T50 Test também é medido o espalhamento, como no teste anterior, porém não serão medidos os diâmetros do espalhamento, e sim tempo que este leva para alcançar a marca de diâmetro igual a 500 mm na placa metálica. O tempo avaliará o mesmo que o Slump Flow Test, a fluidez do concreto. Este teste também é normatizado pela NBR 15823-2/2010 da ABNT.

3.3.3 J-ring test

Este ensaio também é normatizado pela norma NBR 15823-3/2010 da ABNT, sendo possível através dele determinar a habilidade passante do concreto auto adensável. A execução do ensaio se dá da mesma forma que os ensaio anteriores (Slump Flow Test e Slump Flow T50 Test), porém será posicionado o anel J entre a marcação do cone (200 mm) e a marcação do diâmetro de 500 mm (Figura 18). O tempo que o CAA demora até alcançar a marca de 500 mm foi medido, assim como as alturas internas e externas ao anel J em 4 pontos diferentes. A média aritmética entre as diferenças de alturas será o resultado da medida J-ring.

Figura 18 – Esquema do ensaio J-ring test

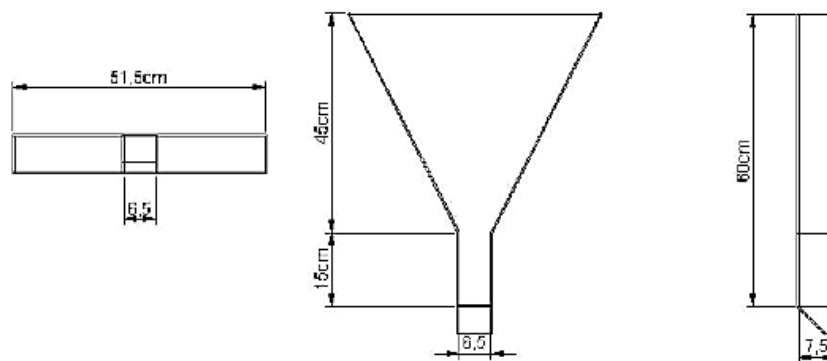


Fonte: Adaptado de NBR 15823-3/2010 da ABNT.

3.3.4 V-funnel test

O ensaio V-funnel test é descrito na norma NBR 15823-5/2010 da ABNT. Ele determina a viscosidade do concreto autoadensável através da medida do tempo que o concreto leva para escoar pelo funil V. As dimensões normatizadas do funil, assim como seu aspecto, podem ser observadas na Figura 19.

Figura 19 – Vista superior, frontal e lateral do funil

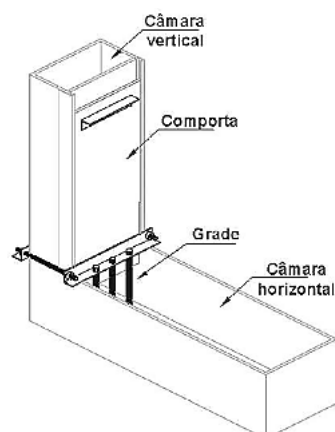


Fonte: NBR 15823-5/2010 da ABNT.

3.3.5 L-box test

O ensaio da caixa L é descrito na norma NBR 15823-4/2010 da ABNT. Ele determina a habilidade passante do concreto auto adensável, assim com o J-ring Test, porém o L-box test simula condições em obra, com formas e armaduras. A caixa em L pode ser observada na Figura 20.

Figura 20 – Caixa em L em perspectiva



Fonte: NBR 15823-4/2010 da ABNT.

3.4 Ensaios no estado endurecido

3.4.1 Teste de compressão axial

Os procedimentos para a realização deste ensaio no estado endurecido do CAA foram realizados de acordo com a NBR 5738/2008 da ABNT. São eles:

- a) Moldagem de 12 corpos de prova para cada concretagem, com 100 mm de diâmetro, untados com desmoldante. Quatro corpos de prova foram rompidos aos 7 dias, 4 corpos de prova aos 28 dias e outros 4 aos 63 dias;
- b) A cura foi realizada em câmara úmida após 24 horas da desforma;
- c) Os corpos de prova, assim que atingiram a idade de rompimento, foram submetidos à prensa hidráulica até a ruptura.

3.4.2 Teste de tração diametral

A resistência à tração foi obtida de forma indireta, através da aplicação por uma prensa de uma carga de compressão diametral no corpo de prova. Este teste segue a norma NBR 7222/1994 da ABNT, os seguintes procedimentos foram necessários:

- a) Moldagem de 12 corpos de prova para cada concretagem, com 100 mm de diâmetro, untados com desmoldante. Quatro corpos de prova foram rompidos aos 7 dias, 4 corpos de prova aos 28 dias e outros 4 aos 63 dias;
- b) A cura foi realizada em câmara úmida após 24 horas da desforma;
- c) Os corpos de prova, assim que atingiram a idade de rompimento, foram submetidos à prensa hidráulica até a ruptura, na Figura 21 é possível observar a prensa hidráulica utilizada para os ensaios.

Figura 21 – Prensa hidráulica



Fonte: Da autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para melhor entendimento e relação entre os resultados obtidos neste estudo optou-se pela separação desta seção de acordo com seu estado. Portanto, serão discutidos os resultados do CAA no estado fresco separadamente do CAA no estado endurecido.

4.1 Estado fresco

Todos os traços estudados foram avaliados em cada ensaio proposto, resultando em uma análise comparativa entre as diferenças e semelhanças dos diferentes teores de adições de CCA com o traço de referência. Todos os resultados obtidos em cada um dos ensaios foram analisados em comparação com o que a norma NBR 15823-1/2010 da ABNT estipula.

4.1.1 Slump Flow Test

Para o ensaio Slump Flow Test a NBR 15823-1/2010 da ABNT estipula que os valores de abertura do teste estão satisfatórios quando dentro do intervalo de 550 a 850 mm de abatimento, estes valores dividem-se em três classes, conforme Tabela 2 do item 2.1 deste estudo. Na Tabela 16 pode-se observar os valores que cada classe compõe, além dos resultados obtidos para cada traço. Dessa forma, o traço de referência que pode ser observado na Figura 22 (a) obteve uma abertura de 750 mm, sendo classificado pela norma como um CAA de espalhamento na classe SF3. O espalhamento do traço com 5% de substituição de CCA resultou também em uma classificação SF3, porém com a abertura de 800 mm, conforme Figura 22 (b). A mesma classificação ocorreu com o traço com 10% de substituição de CCA, porém

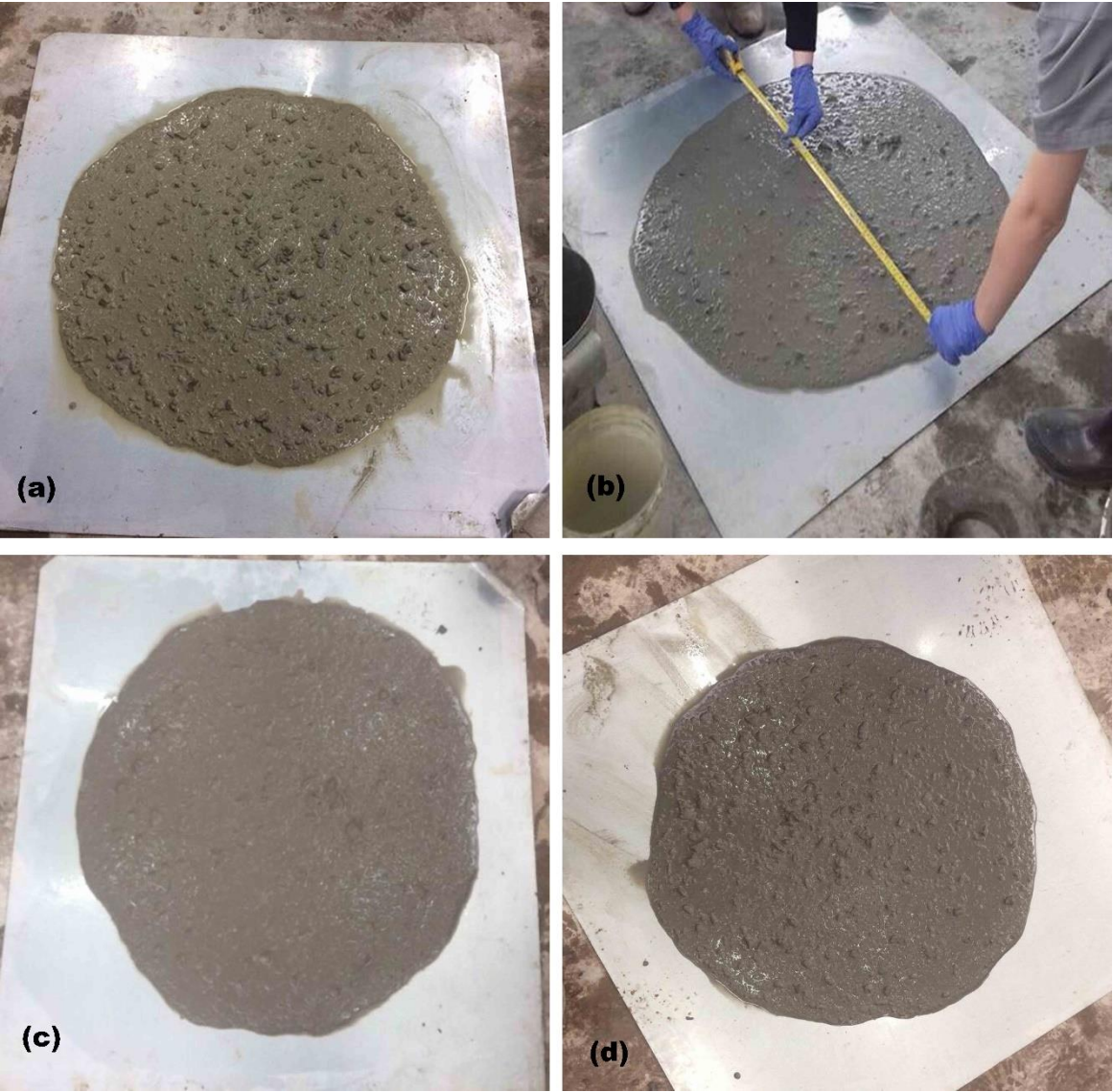
com uma abertura de 780 mm, conforme Figura 22 (c). Já o traço com 15% de substituição alcançou uma abertura de 700 mm, sendo classificado, dessa forma, como espalhamento SF2, como pode ser observado na Figura 22 (d).

Tabela 16 – Classes de espalhamento e valores obtidos no Slump Flow Test

NBR 15823-1		Referência (a)	5% CCA (b)	10% CCA (c)	15% CCA (d)
Classe	Espalhamento (mm)				
SF1	550 a 650				
SF2	660 a 750	750 mm	800 mm	780 mm	700 mm
SF3	760 a 850				

Fonte: Da autora.

Figura 22 – Resultado do Slump Flow Test para cada traço



Fonte: Da autora.

Todos os resultados atingidos no estado fresco se enquadraram nos valores estabelecidos pela NBR 15823-1/2010 da ABNT para que o concreto seja considerado autoadensável. O Slump Flow Test do traço de referência apresentou abertura menor que o traço com substituição de cimento por 5% de CCA, dessa forma pode-se constatar que a substituição agregou fluidez ao traço, porém quando esta foi de 15% de CCA obteve espalhamento menor que o traço de referência, revelando que esta quantidade de CCA resulta em um CAA menos fluído, aumentando a coesão da mistura.

4.1.2 Slump Flow T50 Test

A NBR 15823-1/2010 da ABNT classifica para o Slump Flow T50 Test com duas classes de viscosidade plástica para o CAA. VS1 para concretos autoadensáveis que alcancem o diâmetro de 500 mm em tempo menor ou igual a 2 segundos ou VS2 para concretos que alcancem a marca em mais de 2 segundos, conforme Tabela 3 no item 2.1 deste estudo. Todos os traços testados se classificam na faixa VS2, como pode ser observado na Tabela 17, atingindo a marca de 500 mm em tempo superior a 2 segundos.

Tabela 17 – Classes de viscosidade e valores obtidos no Slump Flow T50 Test

NBR 15823-1		Referência	5% CCA	10% CCA	15% CCA
Classe	T ₅₀ (s)				
VS1	≤ 2	5,30 s	2,75 s	2,80 s	5,60 s
VS2	> 2				

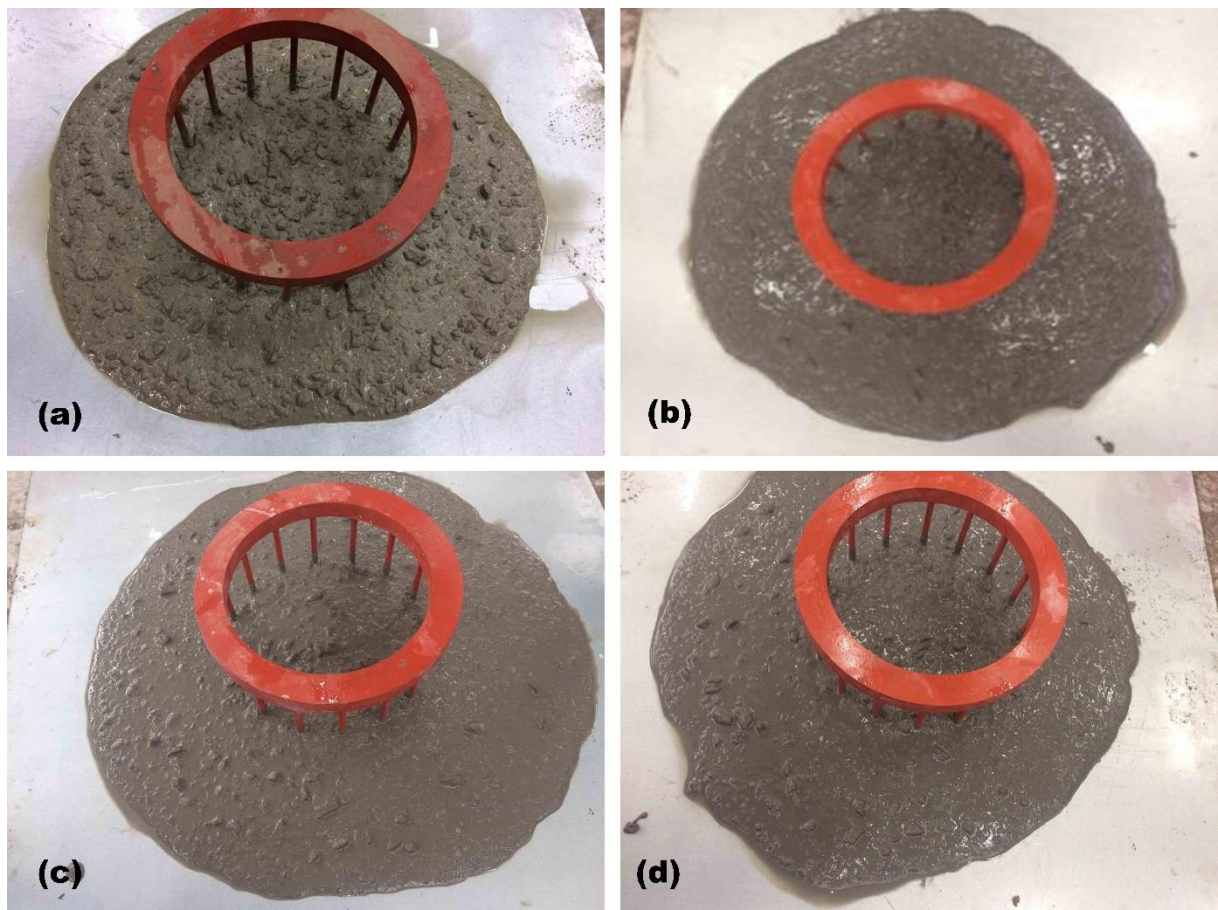
Fonte: Da autora.

O traço de referência alcançou a marca em 5,30 segundos, já o traço com 5% de CCA com 2,75 segundos, dessa forma observa-se um ganho de viscosidade com a substituição. No traço de 10% de CCA não houve mudança significativa, porém no traço com 15% de CCA o tempo foi de 5,60 segundos, igualando-se em viscosidade com o traço de referência.

4.1.3 J-ring Test

O ensaio J-ring Test avalia a habilidade passante do concreto autoadensável em dois níveis: PJ1 e PJ2, conforme Tabela 4 do item 2.1. Todos os traços estudados se enquadraram no nível PJ1, com valores inferiores a 25 mm, como pode ser observado na Tabela 18. Avaliando a habilidade do concreto de cruzar pelas armaduras, simulando um contexto real de forma e ferragens, nenhum dos concretos obteve dificuldade de passagem, porém observa-se que os traços de 5% e 10% de CCA (Figura 23 (b) e (c)) obtiveram menores valores no ensaio, conforme Tabela 18, quando comparados aos valores do traço de referência e de 15% de CCA (Figura 23 (a) e (d)).

Figura 23 – Resultados J-ring test



Fonte: Da autora.

Tabela 18 – Classes de habilidade passante e valor obtidos para o J-ring Test

NBR 15823-1		Referência (a)	5% CCA (b)	10% CCA (c)	15% CCA (d)
Classe	Anel J (mm)				
PJ1	0 a 25 com 16 barras de aço	23 mm	16 mm	18 mm	21 mm
PJ2	25 a 50 com 16 barras de aço				

Fonte: Da autora.

4.1.4 V-funnel Test

A NR 15823-1/2010 da ABNT diferencia o CAA para o ensaio V-funnel Test em duas categorias: VF1 e VF2, de acordo com Tabela 6 do item 2.1 deste estudo. Sendo que na primeira categoria o CAA deve demorar para fluir pelo funil menos de 9 segundos, e na segunda de 9 a 25 segundos. Apenas o traço com 5% de CCA de substituição se enquadrou na categoria VF1, conforme Tabela 19, os outros traços estudados demoraram mais de 9 segundos para fluir, sendo assim, são concretos autoadensáveis VF2. Não houve grande diferença entre os tempos dos CAA enquadrados na segunda categoria.

Tabela 19 – Classes de viscosidade plástica e valores obtidos para o V-funnel Test

NBR 15823-1		Referência	5% CCA	10% CCA	15% CCA
Classe	Funil V (s)				
VF1	< 9	10,38s	7,95 s	9,40 s	10,50 s
VF2	9 a 25				

Fonte: Da autora.

4.1.5 L-box Test

Para o ensaio L-box Test a norma NBR 15823-1/2010 diferencia o CAA na categoria com resultados maiores ou iguais a 0,8 com duas barras de ferro (PL1) ou maiores ou iguais a 0,8 com três barras de ferro (PL2), conforme Tabela 5 do item 2.1. Como pode ser observado na Figura 24 a caixa utilizada para o ensaio possui 3 barras de ferro que simulam ferragens de uma forma, portanto todos os traços estudados

enquadram-se na segunda categoria: PL2. Todos os resultados atenderam a norma, de forma que se igualaram ou superaram a marca que a norma exige, 0,80, conforme pode ser observado na Tabela 20. Tutikian e Dal Molin (2008) acreditam que os resultados do ensaio devem se situar entre 0,80 e 1,00, e quanto mais fluída a mistura mais nivelada ela estará, ou seja, mais próxima de 1,00. Pode se observar que a mistura que obteve o valor mais próximo de 1,00 foi o traço com 5% de CCA, em segundo o traço com 15% de CCA, em terceiro o traço com 10% de CCA e por fim, o traço de referência.

Figura 24 – Realização do L-box test



Fonte: Da autora.

Tabela 20 – Classes de habilidade passante e valor obtidos para o L-box Test

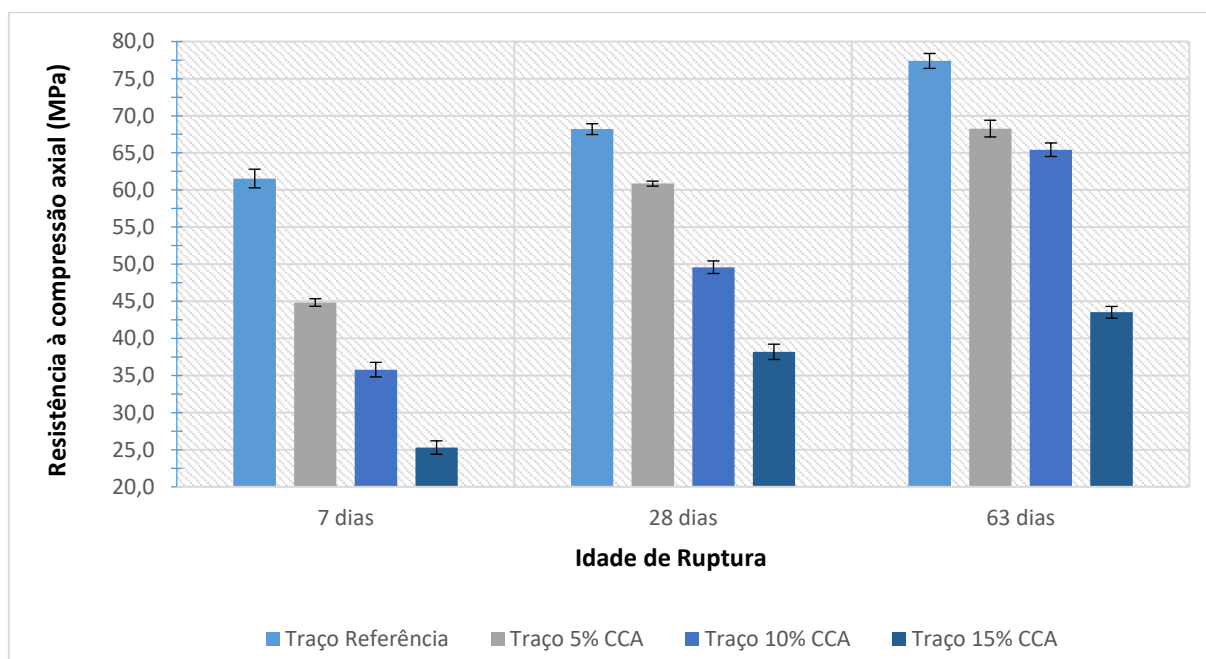
NBR 15823-1		Referência	5% CCA	10% CCA	15% CCA
Classe	Caixa L (H1/H2)				
PL1	≥ 0,80 com 2 barras de aço	0,8	0,98	0,91	0,93
PL2	≥ 0,80 com 3 barras de aço				

Fonte: Da autora.

4.2 Estado endurecido

Para a análise do concreto autoadensável no estado endurecido foi realizada a concretagem de 24 corpos de prova para cada traço, dessa forma 4 CP's foram rompidos em cada idade estipulada (7, 28 e 63 dias). Os resultados do rompimento para a compressão axial podem ser visualizados no Gráfico 5 e no Apêndice C, e para a tração diametral no Gráfico 6 e no Apêndice D.

Gráfico 5 – Resultados da resistência à compressão axial.



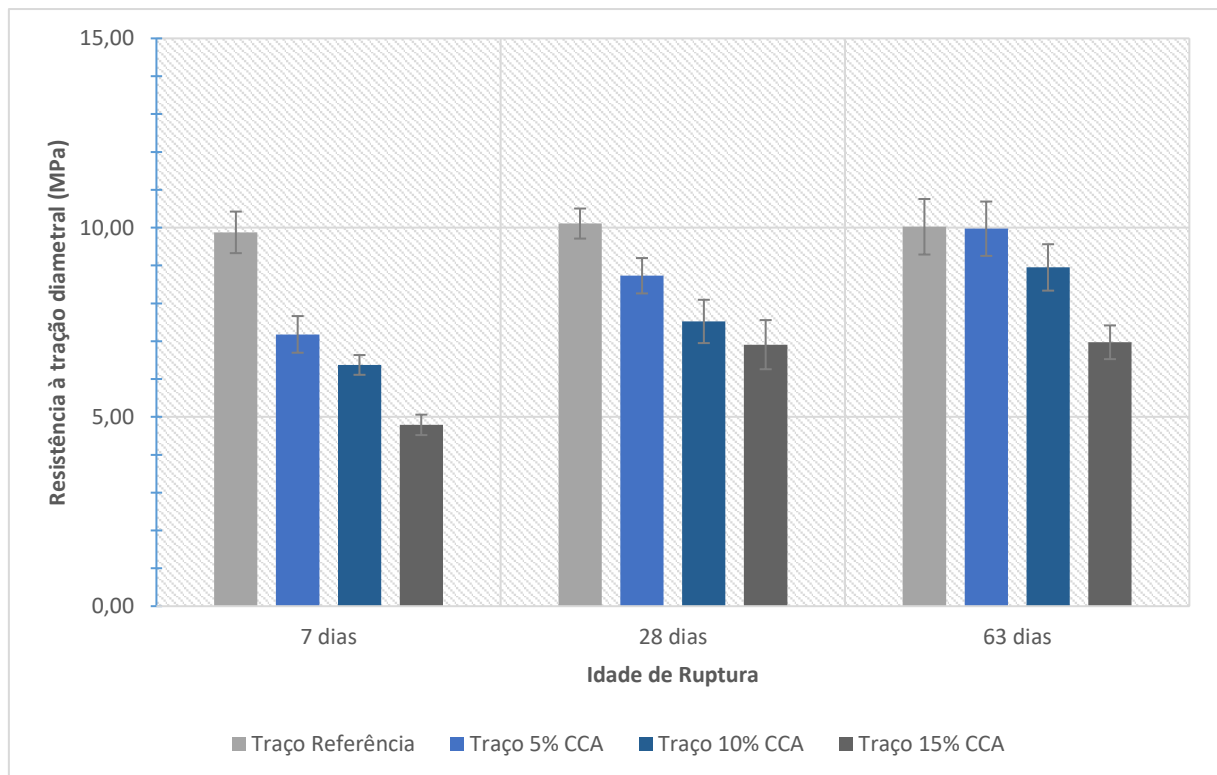
Fonte: Da autora.

Percebe-se uma diminuição da resistência conforme aumenta o teor de substituição do cimento por CCA, fator bem característico nas idades de 7 e 28 dias. Aos 63 dias de idade dependendo da porcentagem de substituição as resistências se equiparam quando levado em conta o desvio padrão dos resultados obtidos. Percebe-se também aumento da resistência à compressão entre os rompimentos de 7, 28 e 63 dias em cada traço estudado. Também percebe-se que aos 63 dias todos os traços obtiveram resistências superiores a 40 MPa de resistência, sendo considerados concretos de alta resistência.

Já no Gráfico 6 percebe-se diminuição da resistência à tração diametral principalmente aos 7 e 28 dias de idade. Na idade de 63 dias observou-se uma equivalência entre o traço padrão e os traços de 5% e 10% de CCA. Não houve

aumento significativo da resistência do traço padrão aos 7, 28 e 63 dias, já os demais traços, com adição, percebeu-se aumento conforme os traços atingiram idades superiores aos 7 dias.

Gráfico 6 – Resultados da resistência à tração diametral



Fonte: Da autora.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com novas pesquisas no âmbito das adições minerais no concreto autoadensável, acredita-se que este possa ser utilizado em maior escala na região, possibilitando obras de maior qualidade e durabilidade, além de menor tempo de execução. Este estudo teve como objetivo principal avaliar a influência que esta substituição parcial do cimento por cinza da casca de arroz causa no CAA, quando comparado ao concreto autoadensável de referência, sem adição de CCA.

A análise dos dados experimentais coletados no desenvolvimento deste estudo permitiu elaborar uma série de considerações que estão resumidas abaixo:

No estado fresco, todos os traços obedeceram aos valores instituídos pela NBR 15823/2010 da ABNT, conforme ensaios que a norma prevê: Slump Flow Test, Slump Flow T50 Test, J-ring Test, V-funnel Test e L-box Test. Cada traço obteve diferentes classificações quanto as classes estabelecidas na norma citada.

Para o traço de referência a classificação obtida quanto ao espalhamento foi SF2, para a classe de viscosidade plástica VS2 e VF2 e, para a classe de habilidade passante PJ1 e PL2. O traço com 5% de CCA obteve classificação SF3 para o espalhamento, VS2 e VF1 para viscosidade plástica e, por fim, PJ1 e PL2 para habilidade passante. Para o traço com 10% de CCA a classificação obtida para o espalhamento foi SF3, para a classe de viscosidade plástica VS2 e VF2, e para a classe de habilidade passante PJ1 e PL2. Por fim, o traço com 15% de CCA obteve classificação SF2 para o espalhamento, VS2 e VF2 para viscosidade plástica e, ainda, PJ1 e PL2 para habilidade passante.

As classes normatizadas permite fácil comparação entre um concreto autoadensável e outro. A partir dos resultados obtidos pode-se perceber que o traço ideal, com melhor habilidade passante e viscosidade, está entre a substituição de 5% e 10% de CCA. Quando o traço foi substituído com 15% de CCA este tornou-se mais coeso, não perdendo suas características autoadensáveis, pois, ao mesmo tempo, aproximou-se dos resultados obtidos no traço de referência.

No estado endurecido observou-se que a cinza de casca de arroz garantiu maiores ganhos percentuais de resistência aos traços com adição, quando comparado ao traço de referência, conforme atingiu idades superiores. O traço de referência obteve um ganho de resistência à compressão de 27% dos 7 aos 63 dias de idade, enquanto que o traço de 5% de CCA aumentou 52%, o traço com 10% de CCA 83% e, por fim, o traço com 15% de CCA aumentou 72%. Portanto pode-se constatar que a cinza agrega positivamente nas características do concreto autoadensável no estado endurecido, mesmo que os traços com adição não tenham atingido a resistência do traço de referência, pode-se constatar que os resultados foram significantes.

Para a resistência à tração diametral pode-se concluir que a cinza também possibilitou maiores ganhos de resistência. Enquanto que o traço de referência aumentou somente 15%, o traço com 5% de CCA aumentou 31%, já o traço com 10% de CCA obteve um aumento de 40% e, por fim, o traço com 15% de CCA obteve aumento de 45%.

Enfim, conclui-se que a cinza de casca de arroz mostrou melhoras significantes para o concreto autoadensável, tais como: melhora da fluidez do concreto em adições entre 5% e 10% e melhora no ganho de resistência conforme idades superiores para qualquer porcentagem de substituição estudada nesta pesquisa.

Desta forma, sugere-se para trabalhos futuros testar outras porcentagens de adição de cinza de casca de arroz, a fim de verificar com maior precisão a faixa ótima de utilização desta adição mineral. Dosar traços utilizando diferentes tipos de aditivo superplastificante. Realizar ensaios que avaliem a durabilidade que o uso cinza garante ao concreto. Além de, avaliar a diferença de custo entre a utilização do concreto convencional e do concreto autoadensável.

BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10024**: Chapa dura de fibra de madeira – Requisitos e métodos e ensaios. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10908**: Aditivos para argamassa e concreto – Ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto auto-adensável, Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: Concreto auto-adensável, Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-3**: Concreto auto-adensável, Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4**: Concreto auto-adensável, Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5**: Concreto auto-adensável, Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5564**: Via férrea – Lastro-padrão. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

BARTOS, P. J. M. **Measurement of key properties of fresh self-compacting concrete**. In: CEN/STAR PNR Workshop. Paris, 2000.

BAUER L. A. Falcão. **Materiais de Construção: Volume 1**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CAVALCANTI, D.J.H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

COUTINHO, Bianca Serra. **Propriedades e Comportamento Estrutural do Concreto Auto-adensável**. Dissertação para Mestrado no Programa de pós-Graduação em Engenharia Civil. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

DOMONE P. L. Self-compacting concrete: an analysis of 11 years of cases of studies. **Cement and Concrete Composites**, v.28, p.197-208, 2006.

EFNARC – European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. EFNARC, 2002. Disponível em: < <http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF>>. Acesso em: 19 de abril de 2017.

ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO. **Ponte Akashi-Kaikyo – O maior tabuleiro suspenso do mundo**. Disponível em: <<http://www.engenhariaeconstrucao.com/2011/11/ponte-akashi-kaikyo-o-maior-tabuleiro.html>>. Acesso em: 05 de junho de 2017.

FARIA, R. **Solução fluída**. Revista Técnica: Edição 132, 2008. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/132/artigo286483-1.aspx>>. Acesso em: 05 de junho de 2017.

GETTU, R.; AGULLÓ, L. **Estado del arte del hormignós autocompactable y su caracterización**. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluna, 2003.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Ed. PINI, 2009.

GÓMES, J.F; MAESTRO, M.B. **Guia práctica para la utilización del hormigón autocompactante**. Instituto Español del cemento y sus aplicaciones. Madrid, 2005.

GOMES, P. C. C. **Optimization and Characterization of high-strenght self-compacting concrete**. 2002. 386 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.

JADOVSKI, Iuri. **Diretrizes Técnicas e Econômicas para Usinas de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição**. 2005. 182 f. Trabalho de Conclusão (Mestrado em Engenharia) – Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

KUFFNER, Bruna H. Bastos. **Análise comparativa das propriedades reológicas no estado fresco e mecânicas de concretos autoadensáveis com substituição parcial do cimento por sílica de casca de arroz**. Dissertação para título de bacharel em Engenharia Civil na Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA. Alegrete – RS, 2013.

LARRARD, F. De. **Concrete optimisation with regard to packing density and rheology**. 3rd RILEM international symposium on rheology of cement suspensions such as fresh concrete, France. 8p, 2009.

MEHTA, P. K; FOLLIARD, K. J. **Rice Husk Ash – A Unique Supplementary Cementing Material Durability Aspects, Recent Advances in Cementitious Materials**. University of Wisconsin, Milwaukee, Wisconsin, Usa, 2002.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Ed. PINI, 2014.

OKAMURA, H. **Self-Compacting high-performance concrete**. Concrete international, v.19, n.7, p. 50-54, 1997.

PEDROSO, F.L. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. Revista Concreto & Construções. IBRACON, n. 57, p. 14-19. São Paulo, 2009. Disponível em: <http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf>. Acesso em 19 de julho de 2017.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da sílica de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

TUTIKIAN, B.F.; DAL MOLIN D. C. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: Ed. PINI, 2008.

ZHANG, M.H; MALHOTA, V.M. **Characteristics of a thermally activated alumina-silicate pozzolanic material and its use in concrete**. Cement Concrete Res, 25 (8), 1713-1725, 1995.

APÊNDICES

APÊNDICE B – Tabelas de resultados do peneiramento das britas 0 e 1

ENSAIO DE GRANULOMETRIA DO AGREGADO GRAÚDO - B0

Tipo do Agregado: **BRITA 0** Data: **07/08/2017**

peneira (mm)	Amostra 1				Amostra 2				MÉDIAS	
	peso retido (g)	peso retido acumulado (g)	% retida	% retida acumulada	peso retido (g)	peso retido acumulado (g)	% retida	% retida acumulada	% média retida	% média acumulada
9,52	25,8	25,80	2,58	2,58	13,2	13,20	1,34	1,34	1,96	1,96
6,35	393,5	419,30	39,35	41,93	509,4	522,60	51,55	52,88	45,45	47,41
4,75	291,1	710,40	29,11	71,04	252,6	775,20	25,56	78,45	27,34	74,74
2,4	274,5	984,90	27,45	98,49	220,5	995,70	22,31	100,76	24,88	99,62
1,18	12	996,90	1,20	99,69	5,6	1001,30	0,57	101,33	0,88	100,51
0,6	0,3	997,20	0,03	99,72	0,1	1001,40	0,01	101,34	0,02	100,53
fundo	0	997,20	0,00	99,72	0	1001,40	0,00	101,34	0,00	100,53

massa da amostra 1 (M1) (g)	1000
massa da amostra 2 (M2) (g)	988,2
módulo de finura	7,48
dimensão máxima característica	9,52

ENSAIO DE GRANULOMETRIA DO AGREGADO GRAÚDO - B1

Tipo do Agregado: **BRITA 1** Data: **07/08/2017**

peneira (mm)	Amostra 1				Amostra 2				MÉDIAS	
	peso retido (g)	peso retido acumulado (g)	% retida	% retida acumulada	peso retido (g)	peso retido acumulado (g)	% retida	% retida acumulada	% média retida	% média acumulada
25	47,1	47,10	2,36	2,36	48,8	48,80	2,51	2,51	2,43	2,43
19	898,4	945,50	44,92	47,28	898,3	947,10	46,20	48,71	45,56	47,99
12,5	815,5	1761,00	40,78	88,05	787,4	1734,50	40,50	89,21	40,64	88,63
9,5	182,4	1943,40	9,12	97,17	169,6	1904,10	8,72	97,93	8,92	97,55
6,3	69	2012,40	3,45	100,62	85,5	1989,60	4,40	102,33	3,92	101,47
4,15	0	2012,40	0,00	100,62	3,5	1993,10	0,18	102,51	0,09	101,56
fundo	0	2012,40	0,00	100,62	0	1993,10	0,00	102,51	0,00	101,56

massa da amostra 1 (M1) (g)	2000
massa da amostra 2 (M2) (g)	1944,3
módulo de finura	7,47
dimensão máxima característica	25

APÊNDICE C – Quadro de resultados de rompimento de CP para compressão axial

TIPO	IDADE (dias)	DIÂMETRO (mm)	ÁREA (mm²)	FORÇA MÁXIMA (kgf)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA (Mpa)	DESVIO PADRÃO MÉDIO
Referência	7 dias	100	7853,98	47773,73	59,65	60,95	1,53
		100	7853,98	50694,25	63,3		
		100	7853,98	49389,52	61,67		
		100	7853,98	41794,46	59,19		
	28 dias	100	7853,98	55489,77	69,29	68,20	0,73
		100	7853,98	54228,24	67,71		
		100	7853,98	54133,2	67,59		
		100	7853,98				
	63 dias	100	7853,98	62713,29	78,3	77,39	1,00
		100	7853,98	61568,57	75,88		
		100	7853,98	62454,07	77,98		
		100	7853,98				
5% de CCA	7 dias	100	7853,98	35426,35	44,23	44,84	0,51
		100	7853,98	36523,71	45,6		
		100	7853,98	36100,32	45,08		
		100	7853,98	35581,88	44,43		
	28 dias	100	7853,98	44542,16	59,62	60,55	0,56
		100	7853,98	48335,37	60,35		
		100	7853,98	48767,4	60,89		
		100	7853,98	49121,66	61,33		
	63 dias	100	7853,98	52863,03	69,18	68,27	1,21
		100	7853,98	54677,55	66,01		
		100	7853,98	47747,81	68,27		
		100	7853,98	52961,88	69,62		
10% de CCA	7 dias	100	7853,98	29256,98	36,53	35,79	0,98
		100	7853,98	27425,18	34,24		
		100	7853,98	28332,44	35,38		
		100	7853,98	29645,81	37,02		
	28 dias	100	7853,98	39133,16	48,86	49,57	0,64
		100	7853,98	37258,16	49,52		
		100	7853,98	40731,67	50,86		
		100	7853,98	39280,05	49,05		
	63 dias	100	7853,98	52595,18	65,67	65,42	0,91
		100	7853,98	52932,16	66,09		
		100	7853,98	50519,13	63,83		
		100	7853,98	52932,16	66,09		
15% de CCA	7 dias	100	7853,98	21687,84	27,08	25,29	0,90
		100	7853,98	20270,79	25,31		
		100	7853,98	19657,31	24,54		
		100	7853,98	19415,37	24,24		
	28 dias	100	7853,98	31823,23	39,74	37,96	0,89
		100	7853,98	30337,05	37,88		
		100	7853,98	29593,97	36,95		
		100	7853,98	27451,1	37,28		
	63 dias	100	7853,98	34449,97	43,01	43,52	0,79
		100	7853,98	35348,59	44,14		
		100	7853,98	36316,33	45,35		
		100	7853,98	33292,13	41,57		

APÊNDICE D – Quadro de resultados de rompimento de CP para tração diametral

TIPO	IDADE (dias)	ALTURA (mm)	DIÂMETRO (mm)	ÁREA (mm ²)	FORÇA MÁXIMA (kgf)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO MÉDIO
Referência	7 dias	193	50	1963,49	15129,64	9,98	9,88	0,55
		194	50	1963,49	13375,61	8,78		
		191	50	1963,49	15216,05	10,14		
		195	50	1963,49	16235,64	10,60		
	28 dias	195	50	1963,49	15025,96	9,81	10,11	0,40
		196	50	1963,49	16477,57	10,70		
		195	50	1963,49	20754,66			
		195	50	1963,49	15025,96	9,81		
	63 dias	198	50	1963,49	13617,54	8,76	10,02	0,73
		200	50	1963,49	15431,48	9,82		
		199	50	1963,49	15769,05	10,09		
		200	50	1963,49	17946,47	11,43		
5% de CCA	7 dias	195	50	1963,49	10446,45	6,82	7,18	0,48
		195	50	1963,49	10100,83	6,60		
		196	50	1963,49	11016,73	7,16		
		192	50	1963,49	12286,90	8,15		
	28 dias	189	50	1963,49	12649,8	8,52	8,73	0,47
		196	50	1963,49	12321,46	8,00		
		193	50	1963,49	13911,32	9,18		
		191	50	1963,49	13824,92	9,22		
	63 dias	200	50	1963,49	16114,67	10,26	9,43	1,08
		197	50	1963,49	16650,39	10,76		
		199	50	1963,49	12174,57	7,79		
		199	50	1963,49	13902,68	8,90		
10% de CCA	7 dias	194	50	1963,49	10247,71	6,73	6,37	0,26
		194	50	1963,49	9971,22	6,54		
		193	50	1963,49	9072,60	5,99		
		192	50	1963,49	9409,58	6,24		
	28 dias	200	50	1963,49	11111,78	7,07	7,52	0,57
		191	50	1963,49	12572,04	8,38		
		191	50	1963,49	10671,11	7,11		
		197	50	1963,49	14153,26			
	63 dias	199	50	1963,49	13902,68	8,90	8,95	0,61
		200	50	1963,49	7845,64			
		200	50	1963,49	15501,19	9,87		
		198	50	1963,49	12572,04	8,08		
15% de CCA	7 dias	195	50	1963,49	7413,61	4,84	4,79	0,27
		194	50	1963,49	8044,37	5,28		
		192	50	1963,49	6964,3	4,62		
		193	50	1963,49	6705,08	4,42		
	28 dias	194	50	1963,49	11837,59	7,77	6,91	0,65
		194	50	1963,49	9452,79	6,20		
		197	50	1963,49	9772,49	6,32		
		196	50	1963,49	11310,51	7,35		
	63 dias	196	50	1963,49	10014,43	6,51	6,97	0,45
		200	50	1963,49	7232,16			
		200	50	1963,49	10636,55	6,77		
		200	50	1963,49	12001,76	7,64		



UNIVATES

Rua Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil

CEP 95900-000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714-7000

www.univates.br | 0800 7 07 08 09